

L'analyse structurelle des réseaux techniques : modélisations, propriétés, vulnérabilités

Serge LHOMME, Université Paris Est (EIVP) - Université Paris 7

Janvier 2012 - Version 1



Introduction

L'objectif de ce papier est de synthétiser les développements concernant l'analyse structurelle des réseaux techniques. Les réseaux techniques sont définis ici comme l'ensemble des réseaux d'ingénierie, fournissant des services primordiaux pour le bon fonctionnement des sociétés « modernes », et dont les structures ont la particularité d'être en permanence tangibles (cela comprend les réseaux viaires, les réseaux d'électricité, les réseaux internet... et exclut les réseaux de téléphonie mobile, les réseaux de transport aérien...). Actuellement, l'analyse des réseaux techniques est très largement dominée par des approches très fonctionnalistes étudiant les propriétés rhéologiques de ces réseaux (*i.e.* étudiant les propriétés concernant les flux supportés par ces réseaux : modèles dynamiques de flux, modèles de congestion...). Néanmoins, depuis les années 2000, nous assistons à un retour de l'étude structurelle des réseaux techniques, fait pour lequel les physiciens théoriques sont pour beaucoup. Ainsi, certains physiciens se sont intéressés à l'étude structurelle de ces réseaux – sans en être foncièrement des spécialistes – afin de donner des perspectives pratiques supplémentaires à des travaux essentiellement théoriques. Ils sont alors venus bousculer des méthodologies préétablies et réveiller des disciplines qui avaient quelque peu délaissé l'approche structurelle (comme la géographie des transports à quelques exceptions près). Cette tendance s'appuie sur un postulat important : l'étude structurelle des réseaux techniques permettrait de faire émerger des éléments de compréhension concernant le fonctionnement, les forces et les faiblesses de ces réseaux. On s'éloigne ainsi des analyses purement « prédictives » au profit d'analyses plus « explicatives ».

1 La modélisation des réseaux techniques sous forme de graphe

La modélisation des réseaux techniques sous forme de graphes est généralement très intuitive. D'ailleurs, la théorie des graphes a débuté avec les travaux d'Euler au XVIII^{ème} siècle et trouverait donc ses origines dans l'étude d'un réseau viaire (les ponts de Königsberg). Ce graphe $G = (N ; L)$ se définit mathématiquement comme un ensemble fini de liens L – correspondant au linéaire du réseau (routes, canalisations, câbles électrique...) – et un ensemble fini de sommets N – correspondant à des éléments ponctuels (intersections, postes de transformation, pompes de relevag...). L'ensemble des réseaux techniques se prête donc plutôt bien à l'analyse de graphes, les liens étant de surcroît tangibles et permanents. Cette modélisation « classique » utilisée par les ingénieurs, les géoéconomistes, etc., peut être qualifiée d'approche directe ou primaire [17].

Plus précisément, la plupart des réseaux techniques sont modélisés sous la forme de graphes valués (pondérés). Par exemple, la distance est souvent une propriété importante de ces réseaux – ils sont ainsi référencés comme des graphes spatiaux – leurs liens sont donc souvent pondérés par cette métrique [11]. Pour certains, cette nature profondément géographique des réseaux techniques implique que leur graphe soit quasi exclusivement planaire [17]. Cependant, il existe de nombreux graphes spatiaux non plans [20]. La distance n'est pas le seul critère de pondération possible pour ces graphes. Les capacités (de flux, de personnes...) peuvent ainsi être jugées comme des facteurs plus discriminants. Dans les faits, la pondération de ces graphes se révèle souvent problématique.

La plupart des graphes modélisant des réseaux techniques sont plus exactement des multigraphes [16]. C'est-à-dire qu'il existe pour certaines paires de nœuds au moins deux arcs les reliant directement. Ainsi, cette redondance permet d'assurer le fonctionnement général d'un réseau et ce malgré des perturbations récurrentes [8], même si cela rend leur fonctionnement plus complexe et plus coûteux.

Les graphes sont des modélisations simplifiées des réseaux. Ainsi, les éléments ponctuels modélisés par des nœuds sont généralement très hétérogènes (ex : du poste source électrique à la simple interconnexion) et les éléments linéaires modélisés par des arcs très hiérarchisés (ex : de l'autoroute au chemin vicinal). C'est pourquoi, ces réseaux doivent souvent être modélisés par des graphes multiniveaux [6]. Cette modélisation n'est donc ni simple, ni anodine, elle fait en réalité l'objet de choix qui ne sont pas toujours explicites. Il est notamment possible d'étudier précisément une sous-catégorie d'un réseau technique (réseaux de transport d'eau potable, réseaux autoroutiers...) afin de minimiser les difficultés de modélisation (ces sous-graphes sont en effet plus homogènes), ou éventuellement d'avoir recours à des pondérations pour

tenir compte des spécificités du réseau étudié (temps d'interconnexion, capacité du réseau...). Les systèmes à base d'agents peuvent alors se révéler plus pertinents pour étudier les réseaux techniques.

Compte tenu de ces imperfections, il peut être intéressant et tout à fait justifié de modéliser ces réseaux différemment, c'est-à-dire d'une manière contre-intuitive. Il est possible d'attribuer la première tentative de ce type à Bill Hillier et Julienne Hanson [13], qui en mettant au point la syntaxe spatiale (*space syntax*), viennent remettre en question la modélisation « traditionnelle » des réseaux viaires. Ainsi, la syntaxe spatiale repose sur une modélisation opposée à l'approche directe, qualifiée d'approche « duale ». En effet, pour faire simple, elle définit les lignes droites (extensions des rues) comme des nœuds et les intersections comme des arcs.

Pour réaliser ce graphe « dual », il est théoriquement nécessaire de déterminer au préalable des cartes axiales (ou angulaires, en anglais *axial maps*) reposant sur des lignes axiales (ou espace d'intervisibilité en anglais *axial lines*) (Fig. 1). Cependant, les définitions des lignes axiales et des cartes axiales sont très floues. Il existe donc différents algorithmes - correspondant à différentes méthodes - pour produire ces cartes axiales (9 selon [3]), basés par exemple sur des critères de visibilité, des noms de rues... Or, l'étude topologique de ces graphes est fortement dépendante des algorithmes de modélisation utilisés qui ne sont pour la plupart que des algorithmes heuristiques [15]. C'est pourquoi, les résultats de ces études soulignent autant (voire même davantage) les caractéristiques de l'algorithme de modélisation que celles du réseau étudié.

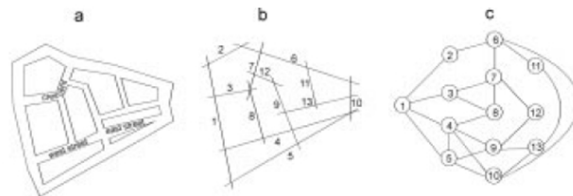


FIGURE 1 – (a) un réseau fictif, (b) la carte axiale, (c) le graphe dual (source : [14])

Les avantages et les inconvénients de cette méthode de modélisation de la voirie urbaine ont déjà fait l'objet de nombreuses synthèses [2, 18]. Le principal avantage de cette méthode est donc de sortir du paradigme très cartésien de l'approche directe, pour une approche qui, si elle se veut aussi très en phase avec les réalités du terrain (très empirique), tente de prendre en considération des aspects plus sensoriels et cognitifs. Cependant, elle accorde une grande importance aux voies les plus longues, entraînant des biais importants. En outre, cette méthode supprime les distances géographiques,

alors même que ces distances nécessitent pour certains de traiter les réseaux viaires de manière particulière [9]. Néanmoins, la syntaxe spatiale repose sur la détection de lignes droites et accorde donc une importance relative à la distance, sachant de plus que ce critère peut être réintroduit *a posteriori*.

A noter que le terme de graphe dual est abusif et ne correspond pas à la définition mathématique du dual d'un graphe. Dans un graphe planaire topologique, une face est par définition une partie du plan limitée par des arcs, de sorte que deux points de la face puissent toujours être reliés par un trait continu ne rencontrant ni sommet ni arc (*i.e.* les faces sont les surfaces du graphe planaire) (Fig. 2). Le graphe dual G^* de G est le graphe dont les sommets correspondent aux faces de G , et dans lequel deux sommets sont reliés par une arête si et seulement si les faces correspondantes dans G ont une arête en commun (Fig. 2).

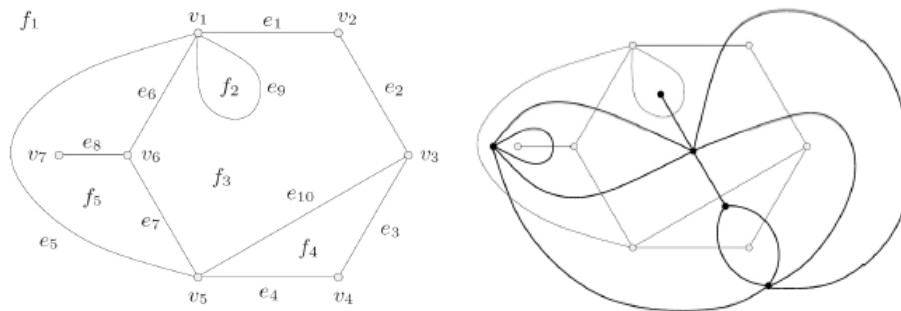


FIGURE 2 – A gauche : un graphe et ses faces. A droite : un graphe et son graph dual (source : [5])

Quoiqu'il en soit, il ne semble pas pertinent d'utiliser la syntaxe spatiale pour étudier d'autres types de réseaux techniques, ce qui limite fortement cette méthode. Cependant, il n'est pas rare que les réseaux techniques nécessitent des modélisations particulières. Par exemple, une structure électrique a été définie. Cette structure ne s'appuie pas sur des distances euclidiennes, mais sur des distances électriques définies par des valeurs d'admittance correspondant à la plus ou moins grande facilité avec laquelle les flux électriques se déplacent dans le réseau [14].

2 L'étude des propriétés structurelles des réseaux techniques

Afin d'étudier les propriétés structurelles des réseaux techniques, il est possible d'utiliser une palette diversifiée d'indicateurs. Ces indicateurs proviennent notamment de l'étude des réseaux viaires qui accordent une importance toute particulière aux distances géographiques, comme par exemple les

indicateurs d'éloignement. L'éloignement moyen d'un graphe peut ainsi être mesuré par la moyenne de l'ensemble des plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds du graphe (1) [10, 23]. La mesure de cet indicateur en un sommet donne, dans une certaine mesure, le niveau d'accessibilité de ce sommet pour l'ensemble du graphe (2). Cependant, cet indicateur n'est applicable qu'à des graphes connexes. C'est pourquoi, il a pu être proposé d'utiliser l'inverse des distances, le terme d'efficacité est alors le plus souvent utilisé (3, 4) [19].

$$L(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j,i \neq j}^n d_{i,j} \quad (1)$$

$$l(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j,j \neq i}^n d_{i,j} \quad (2)$$

$$L^{-1}(G) = E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j,i \neq j}^n \frac{1}{d_{i,j}} \quad (3)$$

$$l^{-1}(i) = e(i) = \frac{1}{N-1} \sum_{j,j \neq i}^n \frac{1}{d_{i,j}} \quad (4)$$

où $L(G)$ est l'éloignement moyen du graphe G , $l(i)$ l'éloignement moyen du sommet i , $E(G)$ l'efficacité du graphe G , $e(i)$ l'efficacité du sommet i , N le nombre de sommets du graphe G , $d_{i,j}$ la plus courte distance entre i et j (cette distance pouvant être géographique, topologique...).

Ces indicateurs d'éloignement permettent en quelque sorte d'évaluer l'efficacité d'un réseau, puisque plus l'indicateur d'éloignement moyen du graphe est faible, plus le réseau étudié pourra être considéré comme efficace. Néanmoins, un simple indicateur d'éloignement n'est pas suffisant pour mesurer l'efficacité d'un réseau. Ainsi, afin de comparer différents réseaux, il est nécessaire de définir des zones d'étude couvrant une superficie donnée, ou de mettre en rapport cet indicateur avec le diamètre du graphe... Cependant, la détermination d'une zone d'étude reste arbitraire et l'utilisation d'autres indicateurs ne permet que partiellement des comparaisons. C'est pourquoi, il a été proposé de comparer le graphe du réseau à un graphe jugé idéal (le graphe de référence). Ce graphe de référence a premièrement pu être défini comme un graphe complet où les distances entre paires de nœuds correspondait à des distances à vol d'oiseau (5). Il est généralement fait référence à un coefficient de rectitude. Devant le peu de réalisme de ce graphe (concernant les réseaux techniques) qui considère alors l'espace comme homogène, il a pu être proposé d'utiliser un graphe de Voronoi pour déterminer ce graphe de

référence (6)[10].

$$C_i^R = \frac{1}{N-1} \sum_{j,j \neq i}^n \frac{d_{i,j}^{eucl}}{d_{i,j}} \quad (5)$$

$$C_i^P = \frac{1}{N-1} \sum_{j,j \neq i}^n \frac{d_{i,j}^{ref}}{d_{i,j}} \quad (6)$$

où C_i^R est le coefficient de rectitude calculé au point i , C_i^P coefficient de performance calculé au point i , $d_{i,j}^{eucl}$ la distance euclidienne entre i et j , $d_{i,j}^{ref}$ la distance la plus courte entre i et j sur le réseau de référence.

Compte tenu de la planéité des graphes étudiés, il est possible de retrouver le même type de problématiques concernant la normalisation de certains indicateurs. Ainsi, certains indicateurs - notamment ceux introduits par les physiciens - nécessitent de comparer les graphes étudiés à des graphes complets, ce qui n'est pas pertinent pour des graphes planaires comme les réseaux techniques. Par exemple, le *clustering coefficient* n'est pas toujours un indicateur pertinent pour étudier un réseau technique (valeur souvent égale à zéro), il faut alors utiliser des variantes [4]. Ainsi, pour les réseaux techniques, il est préférable de comparer le graphe étudié à un arbre couvrant de poids minimum (algorithme de Kruskal) ou d'utiliser des triangulations.

Les indicateurs de centralité constituent une autre grande famille d'indicateurs très utilisés pour étudier les réseaux viaires. Néanmoins, le terme de centralité étant équivoque, ces indicateurs évaluent des caractéristiques parfois très différentes. Malgré tout, ces indicateurs se révèlent être parfois corrélés. Historiquement, les premiers indices de centralité sont les centralités d'ordre (le degré), de proximité (éloignement ou efficacité) ou d'intermédiarité (*betweenness*) (7). Ces indicateurs définissent alors la centralité comme le fait d'être proche des autres - de ses voisins (centralité d'ordre) ou de l'ensemble des nœuds (centralité de proximité) - ou comme le fait d'être au milieu des autres (*betweenness*). Plus récemment, une centralité de rectitude (ou d'efficacité) [7] et une centralité d'information ont été définies. Cette dernière mesure la perte d'efficacité du graphe quand un nœud est supprimé évaluant ainsi l'importance de ce nœud pour les autres nœuds du graphe (8).

$$C_i^B = \sum_{s,t,s \neq t,s \neq i,t \neq i}^n \frac{\sigma_{st}(i)}{\sigma_{st}} \quad (7)$$

$$C_i^I = \frac{E(G) - E(G')}{E(G)} \quad (8)$$

où C_i^B est la centralité intermédiaire (*betweenness*) du sommet i , C_i^I la centralité d'information du sommet i , σ_{st} le nombre de plus courts chemins allant de s à t , $\sigma_{st}(i)$ le nombre de plus courts chemins passant par i .

L'application de ces indicateurs de centralité sur un grand nombre de réseaux viaires a permis d'établir des classifications entre différentes structures de villes [17, 7]. Ainsi, en effectuant une classification hiérarchique à partir de 4 indicateurs de centralité et à l'aide de distances euclidiennes calculées sur des coefficients de gini, une vingtaine de réseaux viaires ont été classifiés en fonction de leurs propriétés structurelles (Fig. 3) [18]. Pour cela, il est souvent nécessaire d'étudier les distributions cumulatives des indices de centralité [17]. Ainsi, les distributions des indicateurs de centralité font émerger des différences entre des villes à l'urbanisme planifié (Los Angeles) et des villes à l'urbanisme auto-organisé (Le Caire) [17].

De son côté, la syntaxe spatiale a développé ses propres indicateurs pour étudier les réseaux viaires. Cependant, ils sont pour la plupart identiques à ceux déjà présentés. Ainsi, l'indice d'intégration qui est un des principaux indicateurs de la syntaxe spatiale – « si fondamental qu'il est lui-même la clef de la plupart des aspects de l'organisation spatiale humaine » [12] – équivaut à une centralité de proximité [15, 17]. Néanmoins, cet indicateur n'étudie plus les plus courts chemins, mais les chemins les plus directs (nécessitant le moins de changement de directions). D'ailleurs, certains auteurs font référence à des indicateurs « angulaires », il ne serait alors plus question d'éloignement moyen mais plutôt d'éloignement angulaire moyen. De la même manière, la centralité devient une centralité angulaire... [21].

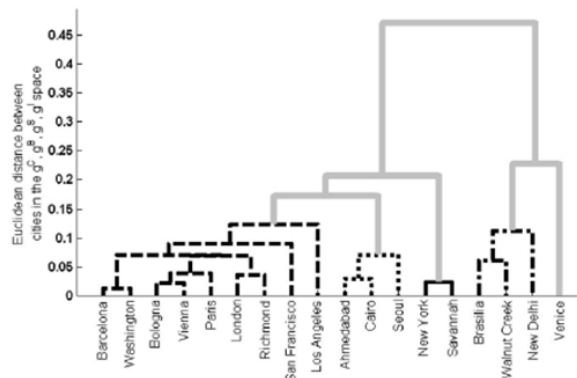


FIGURE 3 – Dix huit villes classées en cinq groupes à l'aide d'indicateurs de centralité (source : [7])

Enfin, même si cette liste d'indicateurs ne prétend pas à l'exhaustivité, il n'est pas possible de passer outre les indicateurs alpha, bêta, gamma très utilisés en géographie des transports. Ce sont des indicateurs « classiques » qui permettent d'évaluer la structure globale d'un réseau technique.

3 Les réseaux techniques et les réseaux théoriques : *scale-free* et/ou *small-world* ?

Depuis que sont apparues ces deux grandes familles théoriques de graphes, une grande variété de graphes issus de systèmes complexes ont été analysés afin de déterminer s'ils étaient *small-world* (petit monde) et/ou *scale-free* (invariant d'échelle, sans échelle caractéristique). Les réseaux techniques n'ont pas échappé à cette règle. Or, la plupart des réseaux techniques ne sont pas *scale-free* ou *small-world*. Certains auteurs l'expliquent par leur nature profondément géographique qui, en les encrant profondément dans les territoires, empêche l'émergence de certaines structures. Ainsi, la planéité induite par cette nature géographique implique une variance de degrés extrêmement faible [17].

Ces réseaux techniques sont alors généralement caractérisés par un rapport constant entre le nombre d'arcs et le nombre de nœuds, propriété d'un réseau aléatoire. Cependant, les réseaux techniques sont loin de partager les mêmes caractéristiques que ces réseaux aléatoires. Ainsi, concernant l'étude de la distribution des degrés du réseau électrique nord américain, la probabilité de trouver des nœuds de degrés élevés se révèlent beaucoup plus faible que pour un réseau *scale-free*, mais cette probabilité est bien supérieure à celle d'un réseau aléatoire [1]. En fait, il existe généralement au sein des réseaux techniques des nœuds de forts degrés (place de l'étoile, république, nation, etc., pour le réseau viaire parisien). Par conséquent, il existe une certaine hiérarchie qui n'est pas présente au sein des réseaux aléatoires. C'est pourquoi, certains indicateurs de centralité laissent précisément apparaître des comportements *scale-free*. Par exemple, les réseaux viaires auto-organisés présentent des propriétés similaires aux réseaux *scale-free* en termes de centralité [4, 7]. Les faibles indices de *clustering* de ces réseaux ne permettent généralement pas d'établir une correspondance avec les réseaux petits mondes. Il semble donc bien exister une spécificité des réseaux techniques qui partagent certaines similitudes avec les réseaux *scale-free*, *small-world*, aléatoires, etc., sans pour autant en partager toutes les caractéristiques. Il est alors nécessaire de construire des modèles théoriques spécifiques [14]. De plus, il faut préciser que ces résultats dépendent de la modélisation choisie. En effet, l'approche duale fait généralement apparaître des comportements *scale-free* [15].

4 L'analyse structurelle des réseaux techniques dans un contexte de risques

La méthode la plus utilisée pour étudier les réseaux techniques dans un contexte de risques consiste à supprimer un nœud ou un arc (*i.e.* un composant) du réseau étudié, afin de comparer les valeurs d'indicateurs calculés au préalable sur le réseau « normal » puis sur le réseau « perturbé ». Ainsi, il est

possible de déterminer plusieurs indicateurs de vulnérabilité. Par exemple, un indicateur de référence a été défini pour les réseaux de transport : la vulnérabilité élémentaire [10]. Cet indicateur compare simplement l'éloignement moyen du graphe lorsque le réseau est perturbé (suppression d'un composant) et lorsque le réseau est normal (9). Il est alors possible d'identifier les composants les plus vulnérables pour l'« efficacité » (le potentiel relationnel [10]) du graphe. Cependant, cet indicateur néglige les problématiques de connectivité, car les relations rendues impossibles par la suppression d'un composant ne sont pas prises en considération. Pour cela, il est possible d'utiliser la centralité d'information (8).

$$V(i) = \frac{L(G) - L(G')}{L(G)} \quad (9)$$

où $V(i)$ est la vulnérabilité élémentaire du sommet i , G' le graphe G privé de i , $L(G)$ l'éloignement moyen du graphe G .

De surcroît, la définition d'un indicateur de référence permet de tester d'éventuelles corrélations entre cet indicateur et d'autres indicateurs d'évaluation des propriétés structurelles du réseau. L'objectif est alors de comprendre pourquoi certains composants apparaissent plus vulnérables que d'autres. Ainsi, la centralité intermédiaire (*betweenness*) se révèle être un indicateur explicatif [10]. En effet, plus un composant aura une centralité élevée, plus celui-ci provoquera une perte d'efficacité importante puisqu'il perturbera un grand nombre de relations.

Un autre indicateur se révèle pertinent à évaluer afin d'étudier la vulnérabilité d'un réseau technique. Il s'agit de l'indicateur de perte de connectivité [1]. Deux nœuds sont connectés s'il existe au moins un chemin entre ces deux nœuds. Il y a alors perte de connectivité (de connexité) si plus aucun chemin ne subsiste suite à la suppression d'un ou de plusieurs composants. Ainsi, l'indicateur de perte de connectivité quantifie le nombre de relations entre paires de nœuds rendues impossibles [1, 7]. Ainsi, chaque composant présente des niveaux de perte de connectivité différents. Des nœuds peuvent alors être jugés plus critiques que d'autres. Cependant, les réseaux techniques sont généralement redondants afin d'éviter que les coupures soient trop nombreuses et ainsi permettre au réseau de continuer à fonctionner et ce malgré la perturbation d'un composant. C'est pourquoi, il est alors pertinent d'étudier le comportement du réseau suite à la dysfonction de plusieurs composants, il est alors question d'étudier des scénarios de défaillance ou des scénarios d'attaque.

Un des objectifs est alors de déterminer les scénarios d'attaque les plus critiques, c'est-à-dire ceux qui vont engendrer les pertes de connectivité les plus fortes, soulignant ainsi la vulnérabilité du réseau à cette attaque. Les attaques aléatoires sont généralement parmi les moins critiques. Une deuxième famille d'attaque est plus critique, elle consiste à attaquer les nœuds ayant

les degrés ou les centralités les plus fortes. Un des scénarios les plus efficaces consiste à attaquer les centralités les plus fortes en recalculant les centralités après chaque attaque (cascading attack). Par exemple, une attaque de ce type impliquant seulement 2% des composants du réseau électrique nord américain engendre une perte de connectivité sur le réseau d'environ 60% et une attaque sur seulement 8% du réseau engendre une rupture quasi-totale du réseau [1] (Fig. 4).

Parallèlement à ces études « statiques » qui ne considèrent pas les conséquences de la redistribution des flux consécutive aux défaillances des composants, des études dynamiques ont été développées. Les résultats sont parfois surprenants, ainsi les scénarios les plus critiques peuvent impliquer les nœuds aux charges les plus faibles [22].

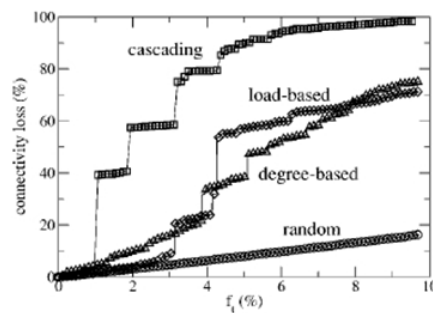


FIGURE 4 – Le réseau électrique américain dans un contexte de risques (source : [21])

La détection de communautés au sein d'un graphe peut aussi se révéler utile afin d'étudier la vulnérabilité des réseaux techniques. Notamment, une technique de *clustering* hiérarchique a été utilisée (partitionnement de données) pour étudier la vulnérabilité des réseaux viaires [4]. L'objectif est alors d'identifier les liens intercommunautaires « faibles » constituant des liens de passages incontournables au sein du réseau pour passer d'une communauté à une autre. En ce sens, ces liens constituent des liens critiques pour le fonctionnement général du réseau. Enfin, certains auteurs se sont aussi proposés d'utiliser les principes de la syntaxe spatiale pour étudier les réseaux viaires dans un contexte de risques. Cette application réalisée sur la ville de Londres fait apparaître un déplacement des centralités au profit de certains espaces situés en périphérie, passant d'une polarité autour du centre en temps normal, vers une multipolarité autour d'une multitude de centres situés en périphérie.

Conclusion

Depuis quelques années l'analyse des propriétés structurelles des réseaux techniques a connu des développements importants. Pour la géographie, ces développements sont intéressants puisqu'ils mettent en avant la nature profondément géographique des réseaux techniques. Plus précisément, pour la géographie des risques, la mise en avant des aspects structurels permet d'améliorer la compréhension des mécanismes d'endommagement en introduisant notamment la vulnérabilité structurelle.

Références

- [1] R. ALBERT, I. ALBERT et G. NAKARADO : Structural vulnerability of the North American power grid. *Physical Review E*, 69(2):1–4, février 2004.
- [2] M. BATTY : A new theory of space syntax. *Syntax*, 44(0):36, 2004.
- [3] M. BATTY et S. RANA : The automatic definition and generation of axial lines and axial maps. *Environment and Planning B Planning and Design*, 31(4):615–640, 2004.
- [4] A. CARDILLO, S. SCCELLATO, V. LATORA et S. PORTA : Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E*, 73(6):1–8, juin 2006.
- [5] M. CARDILLO : *Structural Properties of Planar Graphs of Urban Street Patterns*. Thèse de doctorat, 2010.
- [6] L. CHAPELON : Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité. *Mappemonde*, 3:28–36, 1996.
- [7] P. CRUCITTI, V. LATORA et S. PORTA : Centrality in networks of urban streets. *Chaos (Woodbury, N.Y.)*, 16(1):015113, mars 2006.
- [8] L. DUENAS-OSORIO, J.I. CRAIG, B.J. GOODNO et A. BOSTROM : Interdependent response of networked systems. *Journal of Infrastructure Systems*, 13(3):185, 2007.
- [9] M.T. GASTNER et M.E.J. NEWMAN : The spatial structure of networks. *European Physical Journal B*, 49(2):5, 2004.
- [10] J.F. GLEYZE : *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*. Thèse de doctorat.
- [11] S.P. GORMAN, L. SCHINTLER, R. KULKARNI et R. STOUGH : The Revenge of Distance : Vulnerability Analysis of Critical Information Infrastructure. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 12(2): 48–63, juin 2004.

- [12] B. HILLIER : *Space is the machine*, volume 18. Cambridge University Press, 1996.
- [13] B. HILLIER et J. HANSON : *The social logic of space*, volume 6. Cambridge University Press, 1984.
- [14] P. HINES, S. BLUMSACK, E. Cotilla SANCHEZ et C. BARROWS : The Topological and Electrical Structure of Power Grids. *2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pages 1–10, 2010.
- [15] B. JIANG et C. CLARAMUNT : A Structural Approach to the Model Generalization of an Urban Street Network. *GeoInformatica*, 8(2):157–171, 2004.
- [16] M. NABBA : *Morphodynamique de réseaux viaires Application au risque*. Thèse de doctorat, 2011.
- [17] S. PORTA, P. CRUCITTI et V. LATORA : The network analysis of urban streets : A dual approach. *Physica A*, 369(2):25, 2004.
- [18] C. RATTI : Space syntax : some inconsistencies. *Environment and Planning B Planning and Design*, 31(4):487–499, 2004.
- [19] A. SHIMBEL : Structural parameters of communication networks. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 15(4):501–507, 1953.
- [20] H.P. THADAKAMALLA, R. ALBERT et S.R.T KUMARA : Search in spatial scale-free networks. *New Journal of Physics*, 9(6):190–190, 2007.
- [21] A. TURNER : From axial to road-centre lines : a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 34(3): 539–555, 2007.
- [22] J.W. WANG et L.L. RONG : Cascade-based attack vulnerability on the US power grid. *Safety Science*, 47(10):1332–1336, décembre 2009.
- [23] D.J. WATTS et S. STROGATZ : Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393:440–442, 1998.