

---

# FONCTIONNALITÉ ET VULNÉRABILITÉ DES RÉSEAUX DE TRANSPORT

## LE CAS DU MÉTRO PARISIEN

**Jean-François GLEYZE** : IGN, SR / laboratoire COGIT, 2-4 avenue Pasteur, 94165 Saint-Mandé, France  
[Jean-Francois.Gleyze@ign.fr](mailto:Jean-Francois.Gleyze@ign.fr)

---

**RÉSUMÉ.** *Les catastrophes naturelles et anthropiques menacent d'endommager les réseaux de transport, non seulement de manière structurelle, mais également de manière fonctionnelle en provoquant des perturbations par le jeu des déviations. Dans ce contexte, nous avons choisi d'étudier le fonctionnement du réseau de métro parisien en mode normal et en mode endommagé. Dans un premier temps, nous définissons et quantifions l'efficacité du réseau pour le rôle qui lui est assigné. Nous caractérisons ensuite le rôle fonctionnel des différentes composantes du réseau en mode de fonctionnement normal. En regard de cette étude, nous considérons enfin l'éventualité de catastrophes et étudions les potentialités du réseau en termes de chemins alternatifs, d'une part, à l'aide d'un indice synthétique issu de la recherche sur les transports, d'autre part, dans le contexte de scénarios d'endommagement précis. Les conclusions de ce travail éclairent la compréhension du fonctionnement du réseau dans une logique de prévention de risques.*

**ABSTRACT.** *The natural and anthropic disasters may cause damages on transportation networks, not only in a structural way but also in a functional way by leading to disruptions through the diversions. From this viewpoint, we aim to study the running of the parisian underground in usual mode and in damaged mode. We first define and quantify the efficiency of the network to fulfil its role. Then, we characterize the functional role of the network components in usual running mode. Facing this study, we consider at last that disasters may happen and study the network potentialities to offer alternative paths, on the one hand thanks to a synthetic indicator stemming from the traffic assignment theory, on the other hand by analyzing some damaging scenarios. The conclusions of this research clarify the understanding of the network running from a risk preventive viewpoint.*

**MOTS-CLÉS :** risque, réseau, graphe, efficacité, fonctionnalité, plus courts chemins, chemins alternatifs

**KEY WORDS:** risk, network, graph, efficiency, functionality, shortest paths, alternative paths

---

## 1 Contexte

### 1.1 *L'analyse de vulnérabilité dans les études de risques – le cas des réseaux de transport*

Notre travail s'inscrit dans l'action de recherche « *Risques* » du laboratoire COGIT de l'IGN, et s'intéresse à ce titre à l'impact des catastrophes sur le fonctionnement des réseaux de transport. De fait, les dommages engendrés par les catastrophes sur les réseaux ne se limitent pas à la dégradation structurelle des infrastructures, car celle-ci est susceptible de provoquer en chaîne des perturbations fonctionnelles sous la forme de coûts d'exploitation accrus en temps et en kilomètres. Les dommages se répartissent en dommages directs (dommages structurels dus à l'action « physique » du phénomène) et en dommages indirects (dommages liés aux perturbations conséquentes), pour lesquels les coûts sont d'ordre de grandeur comparables. Dans ce contexte, nous nous intéressons à l'évaluation des dommages indirects et plus précisément à la propension des réseaux à subir des dysfonctionnements consécutivement à l'impact physique de catastrophes (Gleyze, 2000). Cette sensibilité du fonctionnement du réseau aux modifications structurelles des infrastructures correspond à la vulnérabilité du réseau. En ce sens, les différentes composantes du réseau (nœuds de connexions et tronçons) sont d'autant plus vulnérables que leur indisponibilité compromet le bon fonctionnement du réseau en provoquant une baisse d'efficacité dans la mise en relation des lieux sur le territoire. Ce schéma constitue le fondement à partir duquel nous allons aborder l'étude des réseaux de transport dans une logique de risques.

### 1.2 *L'exemple étudié : le réseau de métro parisien*

Nous avons choisi de développer des méthodes et des outils pour l'analyse de la fonctionnalité et de la vulnérabilité des réseaux en nous intéressant au réseau de métro parisien. Celui-ci présente en effet plusieurs avantages :

- les temps de parcours sont relativement constants entre les stations, d'autant que l'on n'observe pas de phénomènes de congestion semblables à ceux que l'on peut trouver sur les réseaux routiers,
- la connaissance exhaustive du réseau organise (presque) toujours les déplacements selon les plus courts chemins (raisonnement en « information parfaite »),
- l'accès au réseau est circonscrit aux stations et permet de travailler avec des origines et des destinations ponctuelles,
- le réseau est d'une taille offrant un bon compromis : assez grand pour une étude approfondie, mais pas trop complexe pour pouvoir effectuer tous les calculs souhaités.

Dans ce contexte, notre étude va faire l'objet de 2 niveaux d'analyse :

- un niveau contextuel, inhérent au réseau étudié : le choix du réseau de métro implique un travail de modélisation spécifique et une analyse contextuelle des résultats obtenus ;
- un niveau général, dépassant le cadre du réseau étudié : il s'agit d'apprécier les choix de modélisation du métro dans la perspective d'étendre l'étude à d'autres types de réseaux, et d'apprécier les outils mis en œuvre pour la compréhension du fonctionnement et de la vulnérabilité des réseaux en général.

### 1.3 *Objectifs et démarche*

L'objectif de nos recherches est d'identifier les composantes vulnérables d'un réseau par rapport à son rôle de médiateur sur le territoire. Dans ce but, il est nécessaire d'effectuer une analyse préalable du fonctionnement du réseau. Cette étude préliminaire constitue le point central de cette contribution. Elle s'articule autour de 3 points :

- définition du rôle du réseau sur le territoire et mesure de son efficacité,
- caractérisation de l'importance fonctionnelle des composantes du réseau en mode de fonctionnement normal,
- prise en considération de phénomènes dommageables et repérage des composantes du réseau susceptibles d'intervenir pour pallier les dysfonctionnements.

A l'occasion de la synthèse de ce travail, nous replacerons les méthodes et outils utilisés dans la perspective de caractériser la vulnérabilité des réseaux.

## 2 Modélisation

Analyser le fonctionnement du métro suppose de fournir au préalable une représentation du réseau sur laquelle nous allons pouvoir définir, construire, calculer et interpréter des indicateurs mathématiques (Gleyze, 2001a). En pratique, les réseaux de transport sont formalisés par des graphes dont les sommets et les arcs correspondent respectivement aux carrefours (ou nœuds de connexion) et voies (ou tronçons). Cette représentation fait cependant abstraction du territoire sur lequel les individus évoluent : il importe donc de modéliser parallèlement les relations spatiales formulées par les individus et leur traduction en termes de demandes en déplacement sur le réseau.

### 2.1 La représentation du réseau de métro par un graphe

L'étude concerne le réseau de métro parisien inscrit dans les limites de la ville de Paris, et matérialisé par 16 lignes (14 lignes principales et 2 lignes "bis") et 242 stations, ainsi que le présente la Carte 1.

Carte 1 - Le réseau de métro parisien intra-muros (d'après [www.ratp.fr](http://www.ratp.fr))



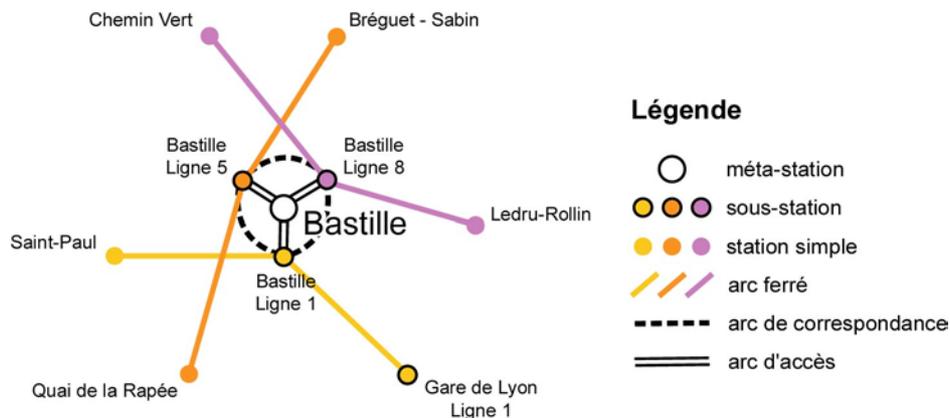
Le réseau est modélisé par un graphe, dans lequel les sommets et les arcs correspondent respectivement aux stations et aux tronçons entre ces stations.

Le point délicat de la modélisation du réseau repose essentiellement sur le choix de représentation des stations à correspondance. En pratique, la pénalité en temps induite par les correspondances exige d'adopter une représentation du graphe tenant compte des délais mis par les voyageurs pour se rendre d'un quai à un autre au

sein d'une même station de métro. Ceci nous conduit à adopter une représentation éclatée des stations à correspondance, selon le principe des zooms nodaux (Chapelon, 1996). Il s'agit de subdiviser chaque station à correspondance en autant de sous-stations qu'il y a de lignes traversant la station considérée – chacune des sous-stations étant intégrée dans le parcours de la ligne qui lui est associée. Les correspondances entre les différentes lignes sont matérialisées par des arcs reliant les sous-stations entre elles. Ces sous-stations sont organisées autour d'une station de niveau supérieur – une "méta-station" – prévue pour les accès entrée-sortie avec le territoire. Les sous-stations sont reliées à la méta-station par des arcs d'accès de longueurs identiques : de cette manière, le calcul du plus court chemin depuis une méta-station sélectionne naturellement et sans calcul supplémentaire la sous-station offrant la meilleure option pour rejoindre la destination.

La modélisation complète des stations à correspondance donne pour la station Bastille la structure présentée en Figure 1.

**Figure 1 - Modélisation des stations à correspondance – exemple de la station Bastille**



Dans la suite de cet article, le terme générique de "stations" désigne les points d'entrée ou de sortie du réseau, à savoir :

- les stations simples, c'est-à-dire les stations traversées par une seule ligne,
- les stations à correspondance, modélisées par des méta-stations.

Pour être complète, la description de ce graphe doit intégrer les temps de parcours associés à chacun des arcs. Pour les tronçons ferrés, nous avons repris les temps de parcours estimés par P. Coroller (2002) à l'occasion d'une étude sur les stations du métro parisien. Pour les arcs de correspondance, une valeur arbitraire de 3 minutes a été attribuée à une grande majorité des arcs. Seules quelques correspondances recensées dans l'Antisèche du Métro (2001) possèdent des valeurs singulières en raison de la longueur des couloirs à parcourir. Enfin, nous avons attribué aux arcs d'accès des valuations suffisamment grandes afin qu'ils ne soient pas préférés aux arcs de correspondance pour relier les sous-stations entre elles.

## **2.2 Les déplacements sur le territoire et les relations origine-destination associées sur le réseau**

La représentation du réseau de métro par un graphe doit s'accompagner de choix cohérents quant à l'intégration du réseau sur le territoire. Le trait d'union entre ces deux entités est réalisé par les usagers : le réseau est en effet mis à la disposition de la population pour se rendre aisément d'un point à un autre du territoire. Il s'agit donc de rendre compte de la demande en déplacement formulée par les usagers du réseau. Cette demande est formalisée par la matrice origine-destination des déplacements, dans laquelle le coefficient  $(i,j)$  correspond au nombre d'usagers souhaitant aller de la station  $i$  à la station  $j$ .

Cependant, la logique de risques dans laquelle nous nous plaçons n'accorde pas tant d'importance à l'usage du réseau qu'à la capacité de ce dernier à desservir tous les lieux du territoire. Dans cette optique, nous avons pris le parti de simuler une demande uniforme sur le territoire, représentative des déplacements d'usagers fictifs dont l'origine et la destination de leur déplacement seraient aléatoires sur le territoire. Pour une origine  $O$  et une

destination  $D$  données, on considère alors que le trajet en métro associé s'effectue entre les stations  $i$  et  $j$  du réseau les plus proches des extrémités  $O$  et  $D$ . La pondération spatiale résultante des stations compense l'hétérogénéité de leur répartition sur le territoire : la demande ainsi simulée permet d'appréhender le réseau dans une logique de desserte uniforme du territoire. Pour la suite de notre étude, il est donc important de noter que :

- la « demande en déplacement » utilisée ne correspond pas à un usage réel mais est la représentation d'interactions spatialement uniformes sur l'ensemble du territoire,
- les « flux d'usagers » observés sur le réseau correspondent à des densités de probabilité de fréquentation pour ce mode d'interactions.

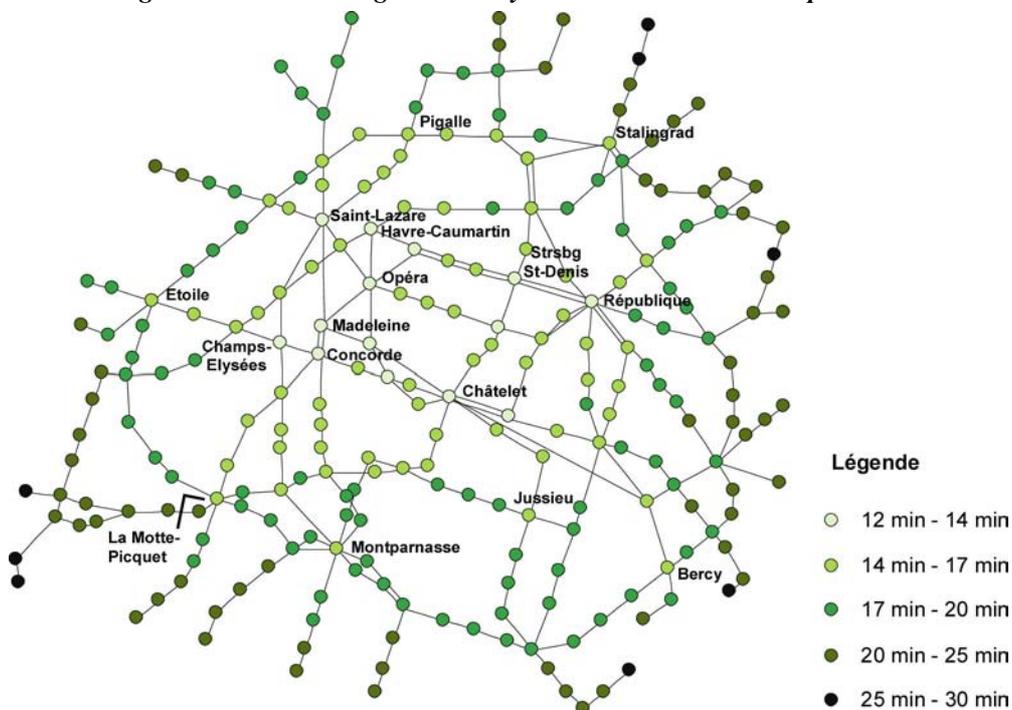
### 3 Le fonctionnement du réseau de métro en mode normal

Le rôle fondamental d'un réseau de transports est d'assurer les relations entre les lieux d'un territoire compte-tenu de la demande en déplacement. Analyser le fonctionnement d'un réseau consiste ainsi d'une part à déterminer dans quelle mesure le réseau remplit son rôle, d'autre part à dégager les mécanismes structurels sous-jacents.

#### 3.1 Analyse de l'efficacité du réseau – Les indices d'accessibilité

La manière la plus naturelle d'évaluer l'efficacité d'un réseau de transports est de mesurer l'accessibilité des différents lieux desservis. Cette notion permet de quantifier la séparation spatiale des lieux sur un territoire desservi par un réseau de transports donné. En ce sens, elle renseigne sur l'efficacité de ce réseau comme médiateur spatial. En particulier, l'indice d'éloignement moyen pour un lieu donné considère la moyenne pondérée des distances (ici des temps de parcours) entre ce lieu et tous les autres lieux du territoire (Pumain & Saint-Julien, 1997). Les valeurs obtenues sur le réseau de métro sont représentées sur la Figure 2.

Figure 2 - Indice d'éloignement moyen sur le réseau de métro parisien



En pratique, les valeurs d'éloignement moyen obtenues sur le métro permettent d'avoir une bonne idée de l'organisation du centre et de la périphérie du territoire parisien desservi par le métro. Il apparaît ainsi que le réseau de métro fournit les meilleurs accès à un large centre ouest de la ville, situé autour du quartier de l'Opéra. D'une part, ce décalage induit un déséquilibre est-ouest, manifesté par une mauvaise accessibilité des quartiers de l'est de la ville (à l'est de la ligne 5 Place d'Italie – Stalingrad). D'autre part, la richesse des correspondances offertes par ce centre facilite les accès sur la rive droite de la ville.

A l'inverse, le réseau offre moins de possibilités sur la rive gauche et rend d'autant plus important le rôle joué par les trois grosses stations à correspondance Montparnasse, La Motte-Picquet et Place d'Italie. Ces stations, ainsi que leurs « homologues » sur la rive droite (Stalingrad, Barbès, Pigalle, Place de Clichy), constituent les points d'échange entre le centre et la périphérie du réseau, matérialisées par les lignes circulaires 2 et 6. Ces dernières marquent en effet la frontière au-delà de laquelle l'accessibilité des stations est rendue difficile du fait de leur position sur les extrémités des lignes.

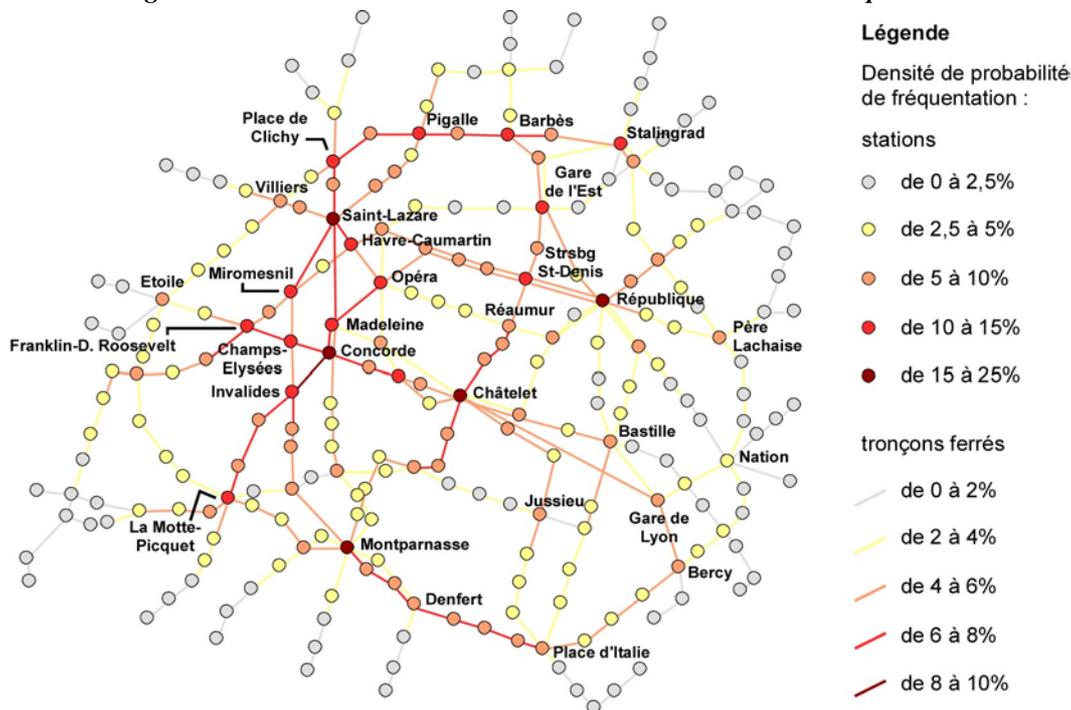
Partant de ces constats généraux sur l'efficacité du réseau de métro dans la desserte du territoire parisien, nous allons maintenant analyser la fonctionnalité de ses composantes en configuration normale.

### 3.2 Analyse de la fonctionnalité du réseau – L'indice de centralité intermédiaire

L'étude de la structure du réseau doit mettre en relief le rôle fonctionnel joué par chacune de ses composantes (sommets et arcs) dans la mise en relation des lieux du territoire. Dans cette optique, l'indice de centralité intermédiaire pour une composante donnée (sommets ou arcs) correspond à la fréquence avec laquelle cette composante se trouve sur les plus courts chemins liant les paires de sommets sur le graphe. (Voir (Freeman, 1978) pour le concept et (Brandes, 2000) pour l'algorithme de calcul). En ce sens, la centralité intermédiaire est une mesure du contrôle des relations au niveau de chacune des composantes du réseau et renseigne de fait sur l'importance fonctionnelle des sommets et des arcs du réseau pour le rôle assigné à ce dernier.

L'étude de la centralité intermédiaire sur le réseau de métro revient à observer les flux qui traversent les différentes composantes du réseau pour la demande en déplacement traitée. Les valeurs obtenues pour cet indice sont représentées sur la Figure 3.

Figure 3 - Indice de centralité intermédiaire sur le réseau de métro parisien



De prime abord, les résultats sur l'indice de centralité intermédiaire font apparaître que le centre fonctionnel du réseau correspond au centre de la ville en termes d'accessibilité. Décalé vers l'ouest par rapport au centre géographique de la ville, le centre fonctionnel regroupe 5 des 10 stations les plus fréquentées du réseau (Concorde, Saint-Lazare, Opéra, Madeleine et Invalides). Par ailleurs, les grosses stations à correspondance ont des indices élevés quelles que soient leur localisation sur le territoire (ainsi en est-il de Châtelet, République, Montparnasse, Strasbourg-Saint-Denis, La Motte-Picquet).

En termes d'arcs, les trafics s'organisent nettement autour de 6 axes majeurs :

- 2 axes rapides nord-sud dans la partie ouest de la ville : la ligne 8 entre La Motte-Picquet et Opéra et la ligne 13 entre Montparnasse et Place de Clichy,
- 2 axes radiaux est-ouest et nord sud : la ligne 1 entre Franklin D. Roosevelt et Châtelet et la ligne 4 entre Gare de l'Est et Odéon,
- 2 axes circulaires au nord et au sud de la ville : la ligne 2 entre Place de Clichy et Stalingrad et la ligne 6 entre La Motte-Picquet et Place d'Italie.

En particulier, l'importance des lignes 8 et 13 confirme le positionnement du centre fonctionnel du réseau autour du quartier centre-ouest Saint-Lazare – Invalides. Par ailleurs, la valorisation des lignes 1, 4, 2 et 6 met en relief l'efficacité d'une organisation circumradiale des déplacements en métro dans Paris.

Ces considérations envisagent le métro dans son mode de fonctionnement normal. Cependant, la logique de risques dans laquelle nous travaillons n'exclut pas l'éventualité de catastrophes. L'indisponibilité résultante de certaines parties du réseau remet en question le fonctionnement courant du réseau, et il s'agit alors d'élargir notre étude fonctionnelle du réseau en prenant en compte la richesse des solutions alternatives qu'il propose.

## 4 Le fonctionnement du réseau de métro en mode endommagé

Dans un contexte de risques, il ne s'agit plus seulement de juger du rôle fonctionnel des nœuds et des tronçons en mode de fonctionnement normal, mais également d'apprécier les possibilités offertes par le réseau en termes de déviations lorsque des incidents surviennent. A cet effet, nous évaluerons un indicateur synthétique représentatif des potentialités du réseau en termes de déviations, puis nous établirons des liens avec le fonctionnement du réseau dans le contexte de scénarios d'endommagement.

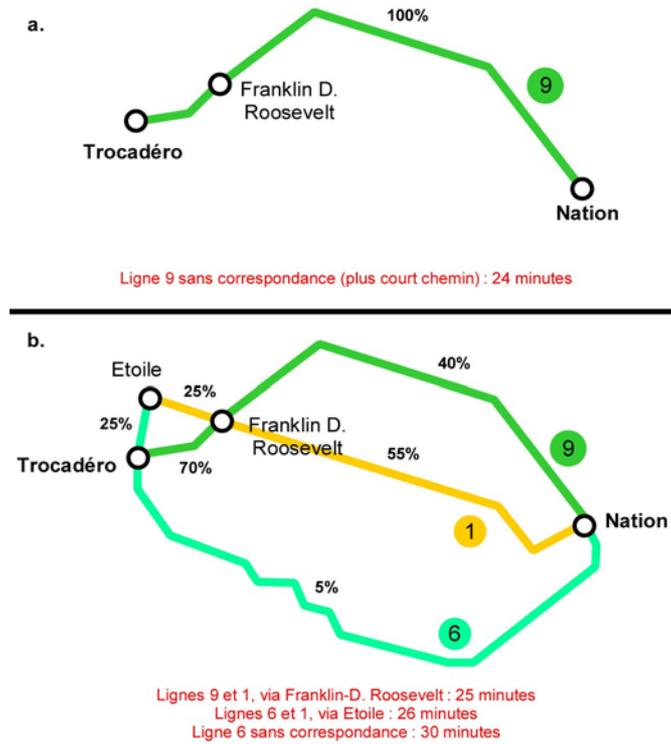
### 4.1 Analyse des chemins alternatifs par un indice synthétique

Pour intégrer l'éventuelle indisponibilité de certaines composantes du réseau, nous sommes amenés à répartir les flux origine-destination non seulement sur les plus courts chemins, mais également sur les chemins alternatifs offerts par le réseau (Gleyze, 2001b).

Les recherches dans le domaine des transports proposent des modélisations probabilistes du comportement des usagers permettant cette nouvelle répartition des flux. Selon le modèle Probit, les usagers ont une connaissance imparfaite du réseau qui se traduit par des valuations probabilistes des différents arcs du réseau dépendantes d'un facteur d'incertitude  $\beta$  (pour plus de détails, voir Y. Sheffi (1985)). Les usagers peuvent ainsi emprunter des chemins alternatifs avec d'autant plus de chances que ceux-ci occasionnent un faible détour par rapport au(x) plus court(s) chemin(s). En pratique, pour la demande en déplacement traitée, la répartition des flux résultant du modèle Probit est évaluée à partir de simulations de Monte-Carlo.

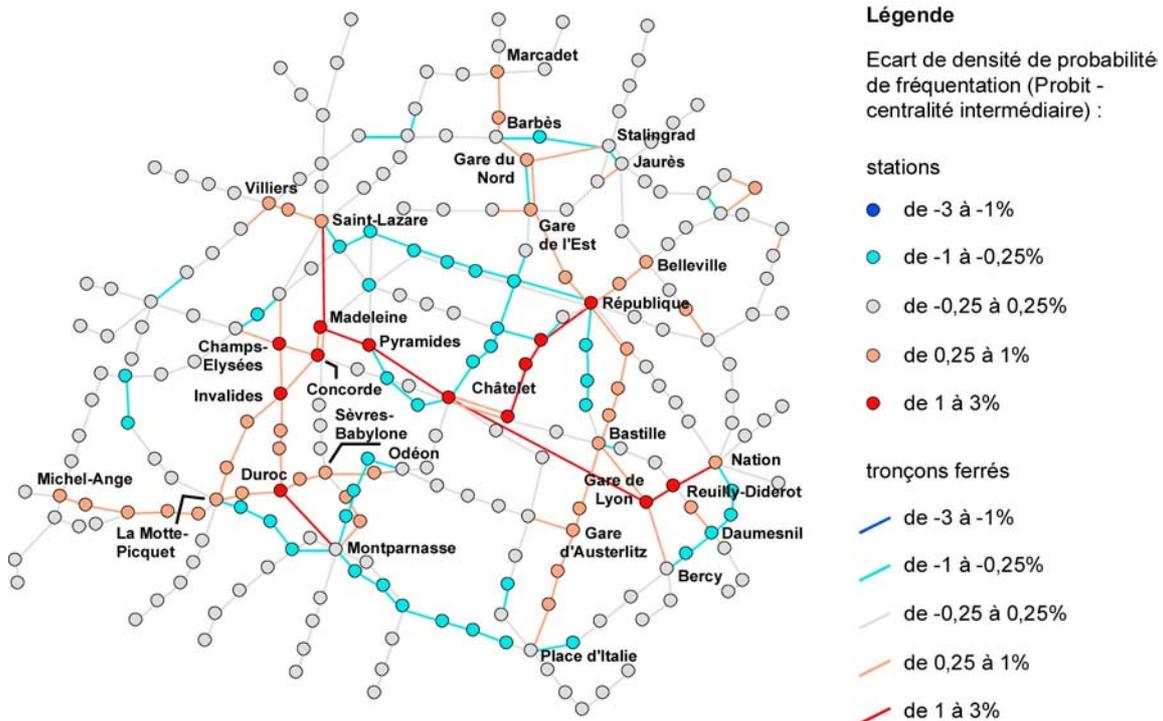
Dans l'exemple de la relation Trocadéro – Nation sur le réseau de métro, les calculs de centralité intermédiaire réalisés précédemment affectaient la totalité du flux sur le plus court chemin matérialisé sur la ligne 9 sans correspondance (cf. Figure 4a). En revanche, dans le contexte du modèle Probit, l'existence de plusieurs chemins entre Trocadéro et Nation répartit les flux sur les différents chemins possibles avec d'autant plus de chances que ceux-ci sont courts. En particulier, seulement 40% du flux entre ces deux stations emprunte le plus court chemin pour une valeur du paramètre  $\beta = 0.5$  (cf. Figure 4b).

Figure 4 - Affectation des flux selon les plus courts chemins (partie supérieure) et selon le modèle Probit ( $\beta = 0.5$ , 100 simulations de Monte-Carlo – partie inférieure) pour la relation Trocadéro – Nation



Ainsi, en considérant les flux résultant du modèle Probit dans le calcul de l'indice de centralité intermédiaire, on définit un nouvel indice de centralité – l'indice Probit – représentatif non seulement de la fonctionnalité naturelle des arcs et des sommets du réseau, mais également de la capacité de chacun d'eux à proposer des solutions alternatives aux plus courts chemins dans l'éventualité de dysfonctionnements.

Figure 5 - différence entre l'indice Probit ( $\beta = 0.5$ , 50 simulations de Monte-Carlo par relation) et l'indice de centralité intermédiaire sur le réseau de métro parisien



En pratique, nous avons calculé l'indice Probit ( $\beta = 0.5$ ) sur les différentes composantes du réseau. Nous avons ensuite calculé la différence entre cet indice et l'indice de centralité intermédiaire introduit précédemment : les résultats de cette opération sont représentés sur la figure 5.

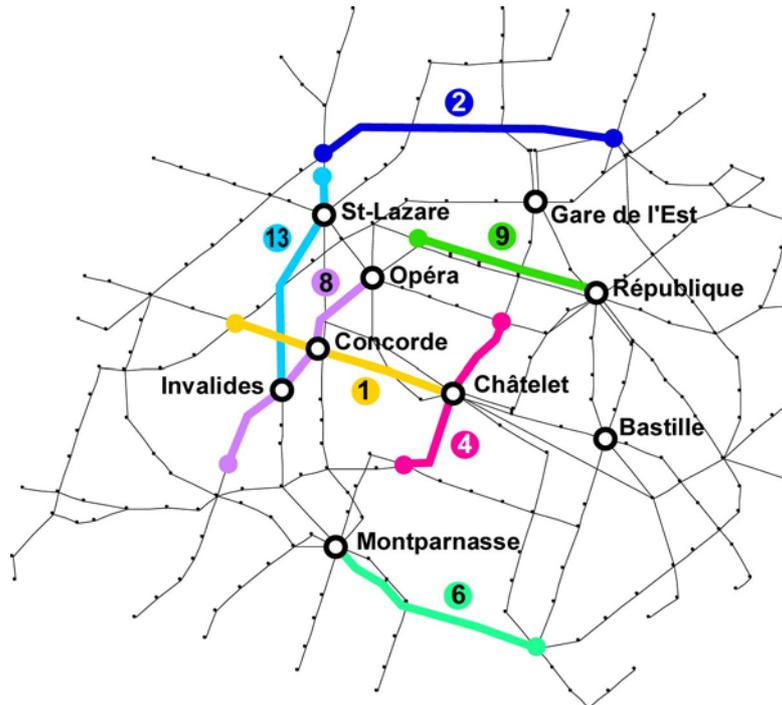
L'intérêt de représenter la différence entre l'indice Probit et l'indice de centralité intermédiaire permet au travers des scores positifs de mettre en valeur les composantes du réseau qui sont susceptibles d'intervenir significativement au sein de chemins alternatifs.

En l'occurrence, la figure 5 souligne l'importance d'un axe alternatif est-ouest (Nation – Gare de Lyon (ligne 1) – Madeleine (ligne 14) – Saint-Lazare (ligne 12)) et d'un axe alternatif nord-sud (Stalingrad – Place d'Italie (ligne 5)). Autour du centre fonctionnel du réseau, les lignes 8 et 13 identifiées précédemment comme des axes principaux de déplacement sont à nouveau mises en valeur ici. En l'occurrence, ces lignes sont fortement imbriquées dans le centre fonctionnel du réseau et empruntent localement des parcours assez proches : elles sont susceptibles de s'épauler mutuellement ou de pallier d'éventuelles lignes en correspondance qui viendraient à défaillir. Notons enfin l'importance locale de certains tronçons radiaux, qui présentent le point commun de pénétrer la ville au niveau des circulaires et de délester celles-ci par des chemins alternatifs empruntant des trajets plus centraux (il s'agit notamment des liaisons Michel-Ange – Odéon (ligne 10) et Belleville – Châtelet (ligne 11)).

Cette étude complète l'analyse fonctionnelle réalisée au préalable. Elle permet notamment d'identifier des axes secondaires de déplacement, selon les directions est-ouest, nord-sud et selon des directions radiales en périphérie. Disposant ainsi d'un panorama sur le rôle fonctionnel des différentes lignes de métro dans une logique combinée de plus courts chemins et de chemins alternatifs, nous allons envisager des scénarios d'endommagement et confronter l'apport des approches synthétique (indice Probit) et contextuelle (étude de scénarios) pour l'analyse de vulnérabilité du réseau de métro.

#### 4.2 Analyse des chemins alternatifs par des scénarios d'endommagement

Figure 6 - Les 16 scénarios d'endommagement envisagés



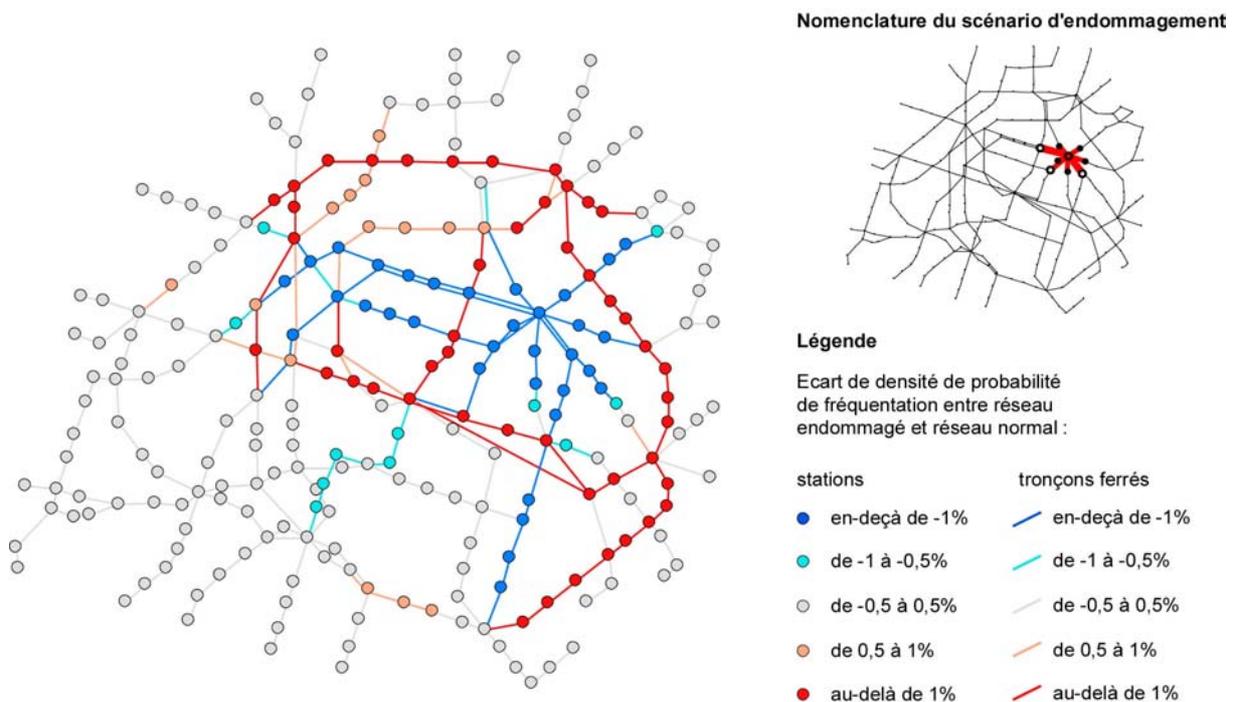
L'analyse de vulnérabilité consiste à identifier les sommets et les arcs du réseau à protéger afin d'éviter d'importants dysfonctionnements en cas de rupture. A cet effet, Holme *et al.* (2002) proposent une démarche prospective consistant à élaborer les scénarios d'endommagement les plus préjudiciables pour le fonctionnement du réseau. Ces scénarios découlent de stratégies d'attaque, dont l'objet est de sélectionner les sommets et les arcs à supprimer successivement afin d'optimiser l'effet destructeur sur le bon fonctionnement du réseau. L'effet destructeur sur le réseau est lui-même apprécié au travers de la baisse d'efficacité, traduite par la dégradation des valeurs de l'indice d'éloignement moyen sur les stations (niveau local) et sur le réseau dans sa totalité (niveau global). A défaut de pouvoir matériellement envisager tous les scénarios d'endommagement, Holme *et al.* (2002)

suggèrent d'adopter des stratégies d'attaque consistant à supprimer les composantes du réseau selon les valeurs décroissantes de centralité intermédiaire. Cet indicateur traduit en effet le rôle de médiateur joué par les composantes du réseau : la suppression des arcs et des sommets enregistrant les plus fortes valeurs de centralité intermédiaire est amenée à provoquer d'importants désordres sur le réseau.

Dans cette perspective, nous avons envisagé 16 scénarios d'endommagement (7 scénarios de rupture partielle de ligne et 9 scénarios de rupture de station – cf. Figure 6). Afin d'évaluer l'impact des ruptures provoquées, nous avons calculé pour chacun de ces scénarios les différences de centralité intermédiaire entre le réseau endommagé et le réseau normal. Les valeurs négatives sont associées aux composantes enregistrant des déficits de charge, c'est-à-dire aux composantes endommagées et aux composantes moins fréquentées étant donnée la nouvelle configuration du réseau. A l'inverse, les valeurs positives permettent de repérer les composantes du réseau assumant les reports de charge en tant que déviations : en ce sens, elles mettent en valeur les chemins alternatifs empruntés pour le scénario d'endommagement considéré, et par inférence les relations fonctionnelles entre les différentes lignes du réseau.

A défaut de pouvoir fournir ici l'analyse complète de tous les scénarios d'endommagement envisagés<sup>1</sup>, nous en retraçons ici les grandes lignes. En guise d'illustration, nous donnons en figure 7 les résultats concernant le scénario de rupture de la station République.

**Figure 7 - Différentiel de centralité intermédiaire observé après endommagement de la station République**



Les écarts de centralité intermédiaire observés sur les différents scénarios font nettement apparaître l'organisation de déviations autour des composantes endommagées. Ces déviations contournent souvent un secteur plus large que celui qui a été réellement endommagé, en raison notamment de la logique de lignes du réseau de métro : en pratique, les zones enregistrant des déficits de charge s'étendent depuis le secteur endommagé jusqu'aux stations de correspondance voisines. Par ailleurs, les déviations se ramifient parfois bien au-delà du voisinage proche du secteur endommagé : dans cette circonstance, l'étendue des chemins alternatifs dénote à la fois l'importance fonctionnelle des composantes impliquées et l'emprise des relations qu'elles contribuent à assurer en temps normal.

Un examen plus détaillé de la structure des déviations fait ressortir des points communs entre les différents scénarios et éclaire nos analyses préalables. Il apparaît notamment que les déviations s'articulent conjointement

<sup>1</sup> Les 16 scénarios d'endommagement sont présentés et analysés en détail dans le rapport de stage de Fouillet M. (2002).

sur les deux catégories d'axes que nous avons identifiés précédemment, à savoir les axes majeurs et les axes alternatifs de déplacement.

Parmi les aspects fonctionnels soulevés par l'étude des scénarios, on note par ailleurs que :

- les scénarios confirment l'importance fonctionnelle des axes principaux et des axes alternatifs de déplacement précédemment identifiés, mais nuancent cette distinction en les faisant intervenir conjointement dans la structure des déviations ;
- les scénarios apportent des informations complémentaires sur le fonctionnement du réseau à un niveau local en mettant en valeur des mécanismes plus complexes, comme le fonctionnement combiné de deux lignes au niveau d'une correspondance, le rôle d'une station à correspondance dans le fonctionnement d'une ligne, etc. ;
- les scénarios révèlent enfin certains aspects du fonctionnement du réseau, mais ceux-ci ne peuvent être mis en évidence par l'analyse des indices synthétiques car ils dépendent du contexte de l'endommagement et des composantes impliquées.

Dans l'exemple du scénario de rupture de la station République, on note ainsi point par point :

- la portée de l'endommagement allant jusqu'à la Place d'Italie, et soulignant ainsi le rôle de République dans le bon fonctionnement de la ligne 5,
- l'ampleur du contournement de la station, impliquant de manière nette les circulaires, mais aussi un ensemble d'axes majeurs (lignes 1, 4 et 13) et alternatifs (ligne 14),
- les effets de combinaison de lignes par le jeu des correspondances, provoquant un déficit de charge sur la ligne 4 suite à la baisse de fréquentation de la ligne 11 (en correspondance à Châtelet) et un report de charge sur la ligne 13 suite à la fréquentation accrue de la circulaire 2 (en correspondance à la Place de Clichy),
- les surcharges contextuelles des lignes 7 et 12 dans leur partie nord, soulignant par là l'importance de la station République dans le désenclavement des quartiers nord-est de la ville.

L'étude de scénarios d'endommagement complète ainsi l'analyse fonctionnelle du réseau en replaçant le rôle joué par les lignes et les stations dans différents contextes. Le choix des scénarios doit à ce titre être orienté par les conclusions sur l'importance fonctionnelle des composantes du réseau (principe des stratégies d'attaque) et par l'observation préalable de configurations topologiques particulières au sein du réseau (mise en évidence de phénomènes contextuels).

## 5 Conclusion

### 5.1 Synthèse sur le fonctionnement du réseau de métro parisien

A l'issue de l'étude du fonctionnement du réseau de métro selon son mode normal et selon les variantes d'endommagement, les lignes et les stations apparaissent bien différentes de ce qu'elles nous semblaient être au départ. Le réseau ne se résume plus en effet à une juxtaposition de stations simples et de stations à correspondance, ancrées sur le territoire et reliées par des lignes radiales, transversales ou circulaires, mais se présente comme un objet complexe, où les dynamiques de déplacement hiérarchisent le rôle fonctionnel des stations et des lignes, et induisent des relations de dépendance entre celles-ci et les différentes portions du territoire.

L'intégration du réseau de métro sur le territoire organise les relations autour d'un centre décalé vers l'ouest par rapport au centre géographique de la ville, au niveau du quartier de l'Opéra. Autour de ce centre, les relations s'articulent notamment sur des axes majeurs organisés de manière circumradiale. Les axes majeurs sont par ailleurs épaulés par des axes alternatifs, susceptibles d'intervenir significativement en cas de dysfonctionnements du réseau. Cette hiérarchisation du réseau émane de son analyse globale, fondée sur l'observation des flux à la fois dans une logique de plus courts chemins et dans une logique de chemins alternatifs.

Cette analyse ne peut cependant se dispenser d'une étude contextuelle de scénarios d'endommagement mettant en valeur des mécanismes fonctionnels locaux (dépendance fonctionnelle de lignes en correspondance, enjeu des connexions dans la structure des chemins alternatifs, etc.).

## 5.2 *Vers une évaluation de la vulnérabilité des réseaux de transport*

Les différentes notions d'efficacité, de fonctionnalité et de potentialités du réseau en termes de chemins alternatifs s'assemblent entre elles et vont pouvoir nous permettre, à terme, de quantifier la vulnérabilité des réseaux de transport.

La vulnérabilité est en effet appréciée en regard de la baisse d'efficacité du réseau à la suite d'un endommagement structurel. Ainsi, pour la rupture d'une ou de plusieurs composantes du réseau, il s'agit d'évaluer les différentiels d'accessibilité observés localement et globalement par rapport à la situation de référence.

La prospection des composantes vulnérables du réseau n'est cependant pas envisageable par tâtonnements. Le propos est de mettre en évidence des critères permettant d'avoir une idée *a priori* des composantes dont la rupture serait fortement préjudiciable pour le fonctionnement du réseau. On rejoint ainsi le principe des stratégies d'attaque énoncé par Holme *et al.* (2002), dont les travaux mettent en avant la centralité intermédiaire comme l'un des critères principaux permettant d'expliquer la vulnérabilité au sens où nous venons de la définir.

L'analyse de la vulnérabilité est enfin parachevée par un plan de gestion du réseau adapté dans un contexte de risques. L'étude de la fonctionnalité mais également l'étude des potentialités du réseau interviennent ici pour permettre au gestionnaire de sélectionner les composantes du réseau qu'il convient de protéger. Cette démarche est fortement liée à la forme des catastrophes menaçant le réseau. La connaissance des axes majeurs et alternatifs de déplacement ainsi que l'analyse contextuelle des scénarios d'endommagement est alors utile pour hiérarchiser les priorités de la prévention du risque.

## 5.3 *Perspectives*

Les travaux à venir concernent l'évaluation de la vulnérabilité selon le schéma présenté ci-dessus. Le point important de la démarche concerne la détermination des critères expliquant la vulnérabilité des composantes du réseau. Selon les travaux de Holme *et al.* (2002) et les premiers calculs que nous avons menés sur le sujet, il apparaît que la centralité intermédiaire est un critère important pour repérer les points vulnérables du réseau. Ce critère n'est pas suffisant à lui seul (Holme évoque également le degré des composantes), et nous essayons à présent d'introduire des indices descriptifs de la topologie locale du réseau dans cette caractérisation.

Parallèlement à ce travail sur les stratégies d'attaque, il pourrait être intéressant d'enrichir la description de la fonctionnalité des composantes par l'analyse des relations qui les traversent (portée, orientation...), ceci afin d'intégrer le rôle des composantes dans la compréhension du fonctionnement global du réseau.

Un autre axe de recherche concerne les effets d'échelle. Les relations envisagées sur le territoire opèrent en effet à des échelles très variées, aussi pourrait-il être instructif de hiérarchiser le réseau en fonction de la nature des composantes ou de l'étendue des relations qu'elles assurent. A l'issue, il s'agit de voir comment ces différents niveaux s'emboîtent fonctionnellement et comment ils se viennent en aide lorsque des endommagements surviennent.

Toutes ces pistes viendront compléter l'analyse du réseau de métro, mais elles feront également l'objet de recherches sur des réseaux routiers pour lesquels un travail préliminaire de modélisation sera nécessaire.

## **Remerciements**

Nous tenons à remercier Alain L'Hostis du laboratoire TRACES de l'INRETS pour son aide précieuse dans l'utilisation du logiciel MAP (L'Hostis, Mathis, Chapelon, 2001) pour la réalisation des cartes d'indicateurs présentées dans cet article.

## RÉFÉRENCES

- BRANDES U. (2000), Faster Evaluation of Shortest-Path Based Centrality Indices, *Konstanzer Schriften in Mathematik und Informatik*, n°120 (disponible sur : [citeseer.nj.nec.com/brandes00faster.htm](http://citeseer.nj.nec.com/brandes00faster.htm)), 11 pages
- CBHM Editions (2001), *L'Antiséche du Métro – Quais, sorties, plans des rues et numéros, couloirs de correspondance*, 54 pages
- CHAPELON L. (1996), Modélisation multi-échelles des réseaux de transport : vers une plus grande précision de l'accessibilité, *Mappemonde*, 3/96, pp. 28-36
- COROLLER P. (2002), *Etude des stations du métro parisien*, rapport préliminaire de DESS : Cartographie, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Marne-la-Vallée, 35 pages
- FOUILLET M. (2002), *Etude de l'efficacité d'un réseau de transport – Application au réseau métropolitain parisien*, rapport de stage de fin d'études IUP Génie Mathématique et Informatique de l'université Paris IX Dauphine, réalisé au sein du laboratoire COGIT de l'IGN, 94 pages + annexes
- GLEYZE J.-F. (2000), Apport de l'information géographique dans l'analyse de risques – Applications à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes, *Bulletin d'Information de l'IGN – recherche 2000*, n°72, pp. 69-84
- GLEYZE J.-F. (2001a), Etude topologique de la fonctionnalité des réseaux, *Actes des Journées Cassini 2001 : « Géomatique et espace rural »*, 18 pages
- GLEYZE J.-F. (2001b), Les dommages induits par les coupures du réseau routier – Eléments de recherche pour l'évaluation de la fiabilité d'un réseau routier, *Actes de la conférence : « Risques d'accidents et risques environnementaux dans les transports routiers »*, Besançon, 15 pages
- FREEMAN L. (1978), Centrality in social networks – Conceptual clarification, *Social Networks*, n°1, pp. 215-239
- HOLME P. et al. (2002), Attack vulnerability of complex networks, *Trafficforum* : [www.trafficforum.org/index.html](http://www.trafficforum.org/index.html), 13 pages
- L'HOSTIS A., MATHIS P., CHAPELON L. (2001), *Logiciel MAP – Modèle d'images de synthèse et de cartographie pour l'aménagement des transports*, Laboratoire du Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement de Tours, <http://mapnod.inrets.fr>
- PUMAIN D., SAINT-JULIEN Th. (1997), *L'analyse spatiale (1) : Localisations dans l'espace*, Cours-géographie, Editions Armand-Colin, 167 pages
- SHEFFI Y. (1985), *Urban Transportation Networks : Equilibrium analysis with mathematical programming methods*, Prentice Hall, New Jersey, 400 pages