



HAL
open science

La desserte de Paris par le réseau de métro et de RER

Jean-Francois Gleyze

► **To cite this version:**

| Jean-Francois Gleyze. La desserte de Paris par le réseau de métro et de RER. 2003. halshs-00152210

HAL Id: halshs-00152210

<https://shs.hal.science/halshs-00152210>

Preprint submitted on 6 Jun 2007

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

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

La desserte de Paris par le réseau de métro et de RER

The servicing of the inner-city area of Paris by the metro and the regional express railway

Jean-François Gleyze¹

Résumé Aujourd'hui emprunté pour relier de grands pôles de Paris et de sa banlieue, le réseau de métro a été initialement conçu pour desservir le territoire circonscrit aux portes de la ville. Dans cette logique de desserte spatiale, nous proposons d'appréhender les différentes stations du réseau en fonction de leur emplacement au sein du réseau et de leur rôle dans la mise en relation des lieux. A cet effet, nous considérons plusieurs indices mathématiques prenant en compte d'une part la topologie et la métrique du réseau, et d'autre part la fonctionnalité de ses composantes. Chacun de ces indices apporte des informations dont la combinaison permet d'établir un classement des stations selon un critère global d'importance et de proposer par ailleurs une typologie des stations selon qu'elles sont traversées par une seule ligne ou par plusieurs.

Abstract Nowadays, the Paris metro is used to link the main places of the town and its suburbs. However, this network was initially designed to serve the inner-city area of Paris. In such a spatial servicing context, we aim to study the stations according to their location inside the network and their role in the service between the different places of the territory. Therefore, we consider several mathematical indexes taking into account the network topology, the network metrics and the network component functionality. Each index provides information about different aspects of the network, and the synthesis of the obtained results can be used to classify the stations. In this respect, we propose to draw up a hierarchy of all the stations and a typology of the one-line station subset and of the junction station subset.

Mots-clefs réseau, graphe, territoire, accessibilité, station, métro, Paris

Key-words network, graph, territory, accessibility, station, underground, Paris

1 Introduction

1.1 *Un peu d'histoire*

Après plus d'un siècle d'exploitation, le métro parisien est devenu sans conteste un moyen de transport privilégié dans la capitale. Aujourd'hui perçu comme une « évidence » du territoire parisien, le réseau de métro a cependant suscité tout au long de son évolution de nombreux conflits entre l'État, les pouvoirs locaux, les aménageurs et les Parisiens eux-mêmes (pour plus de détails sur l'historique du métro, voir Berton C. et al., 1998,

¹ Laboratoire COGIT, Institut Géographique National, Saint-Mandé, France

Lamming C., 2001, les sites non-officiels de la RATP et du métro parisien, 2003, et le numéro spécial de La vie du rail et des transports, 2000). Dès le milieu du XIX^{ème} siècle, plusieurs avant-projets sont proposés sous fond de conflit entre réseau d'intérêt local et réseau d'intérêt national. La Ville souhaite en effet doter son territoire d'un réseau dense pour la desserte locale de tous les quartiers, et s'oppose en ce sens à l'État, partisan d'un réseau intégré au chemin de fer national au bénéfice des échanges à plus grande distance. L'échéance de l'Exposition Universelle de 1900 met un terme à ces querelles et fait valoir l'intérêt d'un réseau à caractère local en novembre 1895.

Les grands principes de la conception du métro sont alors ébauchés par l'ingénieur Bienvenüe :

- toutes les lignes sont indépendantes, tous les trains restent sur la même ligne et desservent toutes les stations,
- les lignes sont planifiées de sorte qu'aucun point de Paris ne soit à plus de 400 mètres d'une station et qu'aucun trajet n'occasionne plus de deux changements.

Ce schéma régit le tracé et la construction des lignes de la majeure partie du réseau jusqu'à la mort de Bienvenüe en 1936. A partir de cette date, le réseau intra-muros connaît peu de modifications, à l'exception toutefois des remaniements des lignes 8, 10 et 13 sur la rive gauche. Au lendemain de la guerre, les 13 lignes du métro parisien sont telles qu'aujourd'hui et répondent aux exigences de desserte locale assignées dans le projet fondateur.

En parallèle de cette évolution, l'accroissement de la population des communes limitrophes pose en 1925 la question du prolongement des lignes de métro vers la petite couronne. Au début des années 1930, Bienvenüe se préoccupe par ailleurs du futur réseau régional et soumet à l'étude des liaisons préfigurant les lignes A et B du Réseau Express Régional (RER) actuel. Cette nouvelle position marque le tournant de la conception du réseau au sein du territoire parisien. En particulier, le chantier du RER dans les années 1960 donne une nouvelle dimension au réseau de métro en le subordonnant désormais aux grands réseaux ferrés régionaux et nationaux. Dans les années 1990, la demande en transports régionaux atteint un niveau tel que l'État et la région planchent sur la création d'une nouvelle ligne de RER (projet Eole) et d'une nouvelle ligne de métro (projet Météor) dont l'objectif est de décharger le RER A et d'assumer une partie des voyageurs issus des banlieues desservies par la Gare de Lyon, la Gare Saint-Lazare et le RER C.

Ainsi, le métro, initialement conçu comme un réseau de desserte locale, a évolué au gré d'une politique fondée sur le contrôle des flux à une échelle régionale. Ironie du sort : la « revanche de l'histoire » place aujourd'hui au premier plan les enjeux des connexions entre le métro et les accès aux réseaux RER et SNCF, mettant ainsi en lumière l'importance de stations-

clés du réseau dans son usage (les « stations nodales », évoquées par Dupuy dans une analyse du réseau liée à son usage in Dupuy G., 1993).

La desserte s'efface naturellement devant la performance et l'adéquation à la demande en transports. Il n'en demeure pas moins que la trame du réseau imaginé par Bienvenüe reste toujours une réalité à l'échelle de la Ville. Dans cette optique, nous proposons de laisser de côté la réalité du réseau dans son usage pour analyser le réseau au travers du rôle qui lui était initialement assigné : la desserte de l'espace parisien.

1.2 Contexte et objectifs

L'importance de l'intégration du réseau de métro parisien sur l'espace exclusivement circonscrit aux portes de la ville est une réalité géographique qui n'a pas souffert des orientations régionales du transport en Ile-de-France depuis la construction du RER. Pour preuve, de nombreux secteurs (immobilier, commerces, loisirs) ont une dynamique dépendant des potentialités offertes par le métro. La recherche d'un logement, l'attractivité d'un magasin ou tout simplement le choix d'un lieu de sortie dépendent en effet de l'offre en transports offerte par les stations de métro environnantes. Ce positionnement dans l'appréhension du territoire parisien se traduit dans l'esprit des individus par la volonté de pouvoir atteindre rapidement n'importe quel point de la ville et de disposer à proximité de plusieurs lignes de métro afin de minimiser les désagréments liés aux changements de lignes.

Nous adoptons ce point de vue en appréhendant le réseau comme un outil de desserte spatiale. Dans cette logique, nous proposons de décrire les stations du métro par des indicateurs mathématiques représentatifs de la topologie et de la métrique du réseau, ainsi que de la dynamique des déplacements. Sur la base des résultats obtenus, notre objectif est d'analyser l'intégration du réseau dans l'espace parisien par un critère général représentatif de l'importance des stations et par une typologie des stations reflétant l'efficacité du réseau et la fonctionnalité de ses composantes.

2 Modélisation

L'analyse du fonctionnement du métro suppose de fournir une représentation du réseau sur laquelle il est possible de définir, construire, calculer et interpréter des indicateurs mathématiques. A cet effet, nous formalisons le réseau de transport par un graphe dont les sommets et les arcs correspondent respectivement aux stations et tronçons (tronçons ferrés et couloirs piétons). S'agissant d'observer la desserte de l'espace parisien, le travail de modélisation doit par ailleurs inclure la représentation des relations spatiales entre les stations du réseau et leur traduction en termes de demande en déplacements sur le réseau.

2.1 La représentation du réseau par un graphe

L'étude concerne la combinaison des réseaux de métro et de RER inscrits dans les limites de la ville de Paris, et matérialisés par 16 lignes de métro (14 lignes principales et 2 lignes « bis »), 5 lignes de RER (A, B, C, D et E) et 255 stations, ainsi que le représente la figure 1.

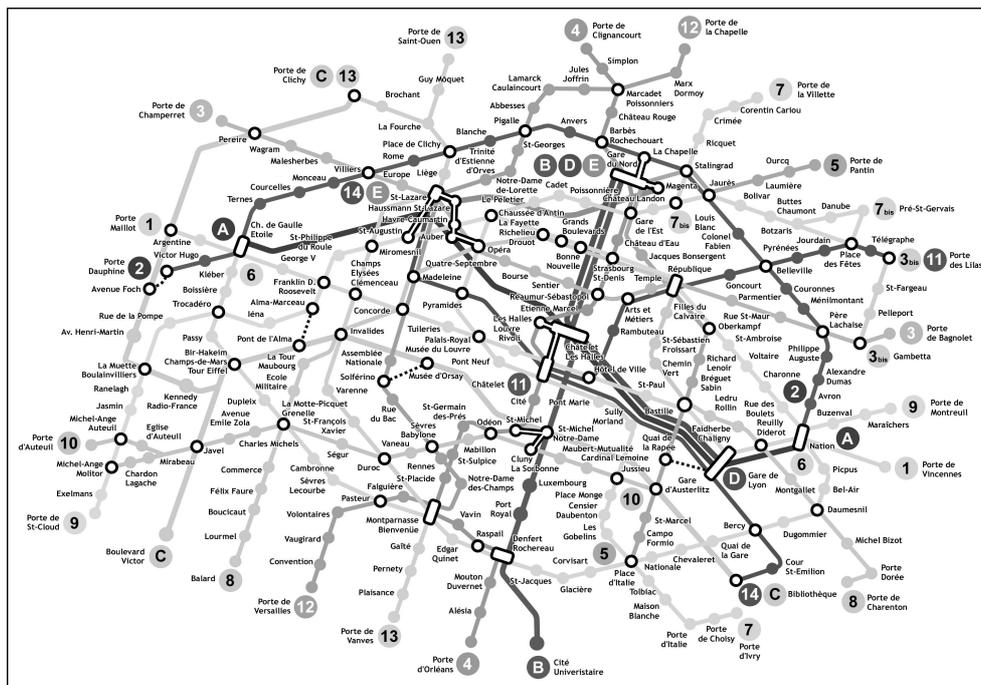


Fig. 1 Le réseau de métro et de RER parisien intra-muros (d'après www.ratp.fr)
Metro and regional express railway of the inner-city area of Paris (from www.ratp.fr)

En pratique, le réseau présenté ici constitue le plan dont disposent les usagers pour choisir leur itinéraire. Il pose d'emblée la distinction fondamentale entre les stations « simples » (stations traversées par une seule ligne) et les stations à correspondance (stations offrant l'accès à deux lignes au moins). En particulier, les stations dessinées en blanc sur le plan représentent les stations à correspondance : chacune d'elle permet d'effectuer des « changements » entre les différentes lignes concernées et offre d'autant plus d'options pour un trajet admettant la station en question comme origine ou destination.

Nous avons intégré cette réalité à notre modélisation du graphe grâce au principe des zooms nodaux (pour plus de détails sur la modélisation, voir Gleyze J.-F., 2003). La modélisation complète des stations à correspondance permet de rendre compte des logiques de changement et d'accès au sein des stations à correspondance, ainsi que le montre l'exemple de la station Bastille en figure 2.

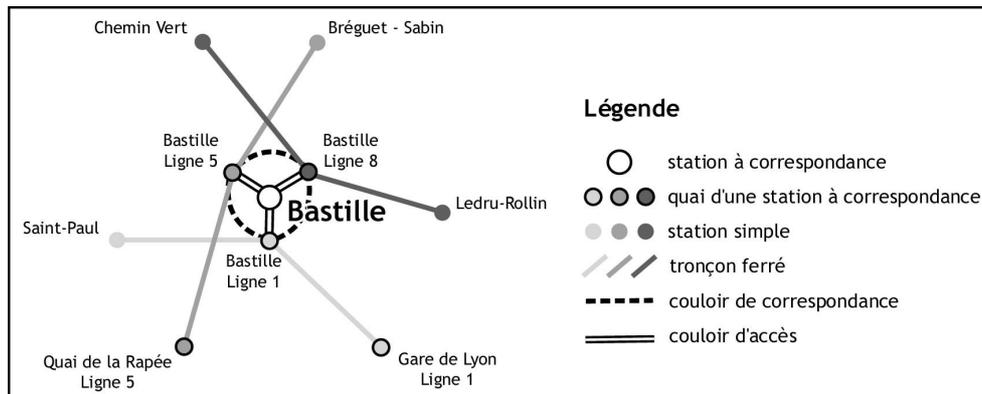


Fig. 2 Modélisation des stations à correspondance – Exemple de la station Bastille
Junction station modelling – Example of Bastille station

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 Coroller (Coroller P., 2002) à l'occasion d'une étude sur les stations du métro parisien, et nous avons renseigné les valeurs manquantes par un chronométrage en rame. Pour les couloirs 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 (CBHM Editions, 2001) possèdent des valeurs singulières en raison de la longueur des couloirs à parcourir. Dans le même registre, les correspondances extérieures autorisées par la RATP (correspondances symbolisées par des pointillés sur la figure 1) ont été prises en considération dans notre modèle avec des temps de parcours incluant la marche à pied entre les stations concernées. Nous avons enfin tenu compte des délais d'attente significatifs pour les RER en intégrant une pénalité supplémentaire à tous les arcs débouchant sur un quai RER.

2.2 La desserte de l'espace parisien et la pondération associée des stations et des relations sur le réseau

L'étude de l'intégration du réseau sur le territoire doit être associée à un usage. Dans les études de transport, le réseau est perçu comme un médiateur spatial mis à la disposition de la population pour effectuer ses déplacements sur le territoire : en ce sens, l'étude intègre une demande en déplacement formulée par les usagers du réseau et formalisée par une matrice origine-destination des déplacements dans laquelle le coefficient (i,j) correspond au nombre d'usagers souhaitant aller du sommet i au sommet j du réseau.

Néanmoins, dans notre cadre d'étude, il ne s'agit pas d'observer le fonctionnement du réseau pour une demande en déplacement représentative de la réalité, mais d'appréhender le réseau dans sa capacité à desservir l'espace sur lequel il est implanté. Par conséquent, nous simulons par la méthode de Monte-Carlo une demande uniforme sur l'espace parisien, c'est-

à-dire une demande représentative de déplacements dont l'origine et la destination seraient tirés selon une loi aléatoire uniforme sur l'espace et rattachés aux stations de métro les plus proches.

Mathématiquement, cela revient à attribuer à chacune des stations i un poids p_i représentatif de la surface de la cellule associée à i dans le diagramme de Voronoï du semis de toutes les stations, puis à pondérer chaque relation entre les stations i et j par un poids normalisé p_{ij} proportionnel au produit $p_i \cdot p_j$.

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'espace de la ville,
- les « flux » observés en conséquence sur le réseau (en particulier à l'occasion de l'indice de centralité intermédiaire) correspondent à des densités de probabilité de fréquentation dans une logique de desserte uniforme de l'espace.

3 Caractérisation des stations par des indicateurs mathématiques

Le travail de modélisation réalisé précédemment va maintenant nous permettre d'appréhender l'importance stratégique des stations du réseau dans le cadre d'une demande spatiale uniforme.

Dans cette partie, nous allons successivement envisager 7 indices mathématiques mettant en valeur différents enjeux de la localisation et du rôle fonctionnel des stations au sein du réseau et de l'espace (ces indices sont inspirés de concepts mathématiques généraux sur les graphes pour lesquels le lecteur aura de plus amples détails dans Wasserman S. et al., 1994, et Freeman L., 1978).

Les premiers indices abordés concernent la configuration topologique locale des stations.

3.1 Indices de topologie locale

3.1.1 Le degré

Concept associé

Nombre d'options offertes par le réseau au niveau de chaque station.

Il s'agit simplement de dénombrer les directions que l'on peut emprunter au départ de chacune des stations.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie

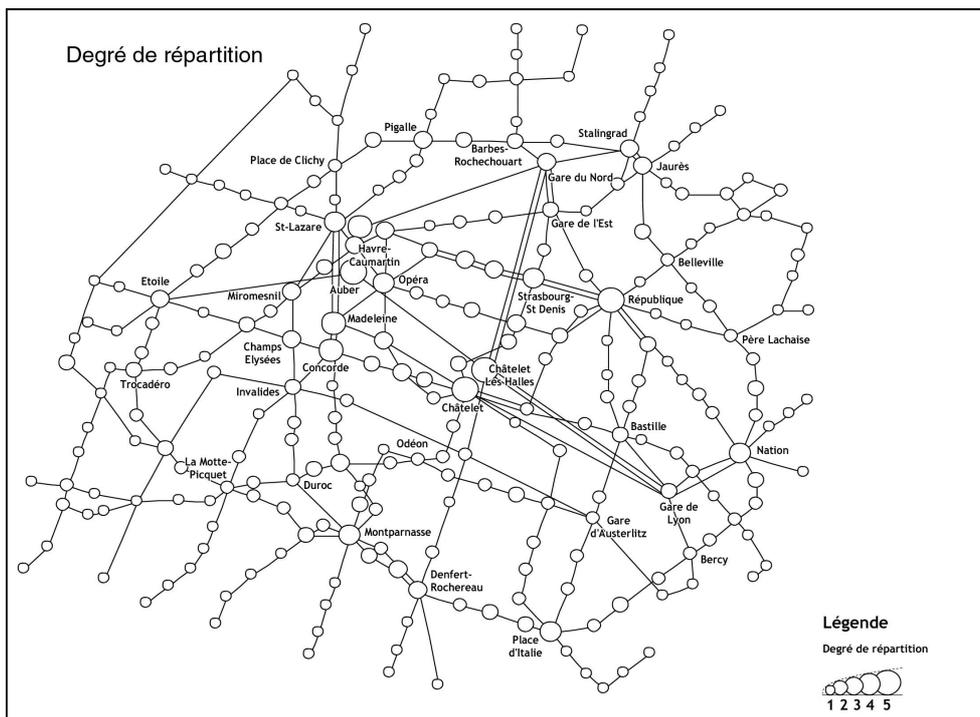
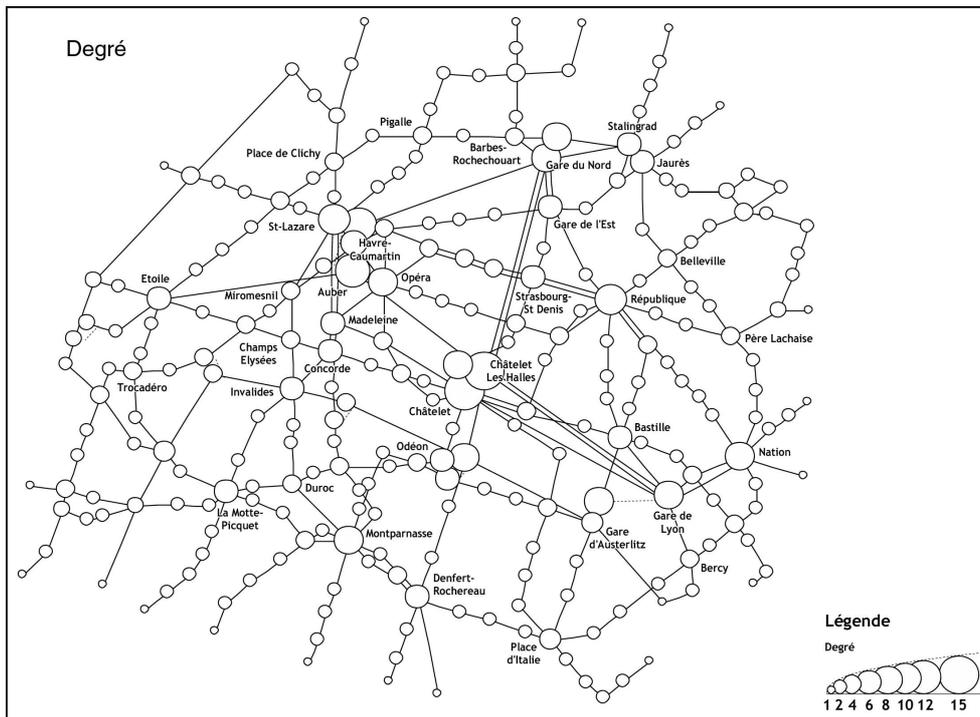


Fig. 3 Indicateurs de topologie locale sur le réseau de métro et RER parisien dans une logique de desserte spatiale uniforme
Local topology indexes on the Paris metro and RER network in a uniform spatial servicing context

Information apportée

Discrimination des stations selon leur complexité topologique locale.

Illustration (fig. 3)

L'indice répartit les stations sur une gamme allant des portes de Paris (indice égal à 1) aux nœuds les plus complexes du réseau (quartier des Halles, quartier Auber, République, Gare de Lyon, Gare du Nord).

3.2.2 Le degré de répartition

Concept associé

Nombre d'options effectivement exploitées au niveau de chaque station.

Le degré de répartition représente la manière dont se répartissent les déplacements depuis un sommet donné sur les arcs adjacents.

Dans les cas extrêmes, pour un sommet de degré n , si tous les arcs adjacents du sommet sont également chargés, le degré de répartition doit être égal au degré ; à l'inverse, si un seul arc adjacent est sollicité, le degré de répartition doit valoir 1. De fait, pour une demande en déplacement donnée, nous définissons le degré de répartition d'un sommet comme le rapport entre la charge totale en entrée-sortie au niveau du sommet considéré et la charge de l'arc adjacent le plus chargé.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique, demande en déplacement considérée

Information apportée

Nuance de l'information relative au degré par la mise en valeur du nombre d'arcs réellement exploités au niveau de chaque station et pour la demande considérée. Discrimination des stations selon les potentialités offertes par les arcs adjacents en tant que moyens d'accès vers différentes zones de l'espace.

Mise en évidence du phénomène de préférence de lignes au départ des stations à correspondance. La connectivité des lignes sur le réseau ainsi que les temps d'accès et d'attente conduisent en effet à favoriser les déplacements sur certaines lignes au détriment d'autres lignes. Cet aspect se traduit par un déséquilibre dans l'exploitation des options offertes au départ de certaines stations à correspondance.

Illustration (fig. 3)

Le degré de répartition permet en premier lieu de bien distinguer les stations simples en fonction de leur situation sur le territoire. Par exemple, les indices des stations périphériques sont proches de 1 et illustrent la concentration des enjeux sur les arcs orientés vers le centre de la ville.

Les rôles centraux et prépondérants de certains centres précédemment identifiés sont ici confirmés (quartier des Halles, quartier Auber, République). En parallèle, certaines stations excentrées à configuration étoilée se distinguent également (Nation, Place d'Italie, Montparnasse). Les faibles scores des stations Notre-Dame, St-Michel et Cluny-la-Sorbonne mettent en relief (valeurs à l'appui) la préférence accordées aux lignes 4 et 10 du métro au détriment des lignes de RER B et C qui leur sont parallèles. Les faibles scores des stations La Chapelle (ligne 2) et Quai de la Rapée (ligne 5) illustrent l'aspect dissuasif des pénalités induites par la marche à pied pour effectuer des correspondances entre ces stations et les gares en relation (respectivement Gare du Nord et Gare de Lyon).

Grâce aux indices de degré, nous avons appréhendé les opportunités offertes localement par le réseau. Nous proposons maintenant d'envisager le réseau au travers de son efficacité à rapprocher les lieux du territoire entre eux et à les rendre accessibles.

3.2 Indices d'accessibilité

3.2.1 L'éloignement moyen (ou accessibilité intégrale)

Concept associé

Moyenne pondérée des meilleurs temps de parcours entre la station considérée et l'ensemble des autres stations du réseau. La pondération doit être représentative de la demande en déplacement choisie.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique, demande en déplacement considérée

Information apportée

Hiérarchisation des stations selon un dégradé concentrique de valeurs. L'indice fait apparaître une logique centre-périphérie, le centre étant localisé au niveau de la zone la plus « accessible » de l'espace compte-tenu des possibilités offertes par le réseau.

Illustration (fig. 4)

Le centre ne correspond pas au centre géographique de la ville, mais est légèrement décalé vers le quartier Auber, en vertu de la forte concentration de stations de correspondance alentour.

Les valeurs d'éloignement moyen croissent à mesure que l'on s'écarte de ce centre. L'utilisation d'une moyenne dans la définition de cet indice tend à lisser le dégradé de valeurs ; cependant, certaines stations se distinguent ponctuellement dans un sens (République, Bercy, Montparnasse) comme dans l'autre (Musée d'Orsay, Pont de l'Alma, Port-Royal, Ledru-Rollin).

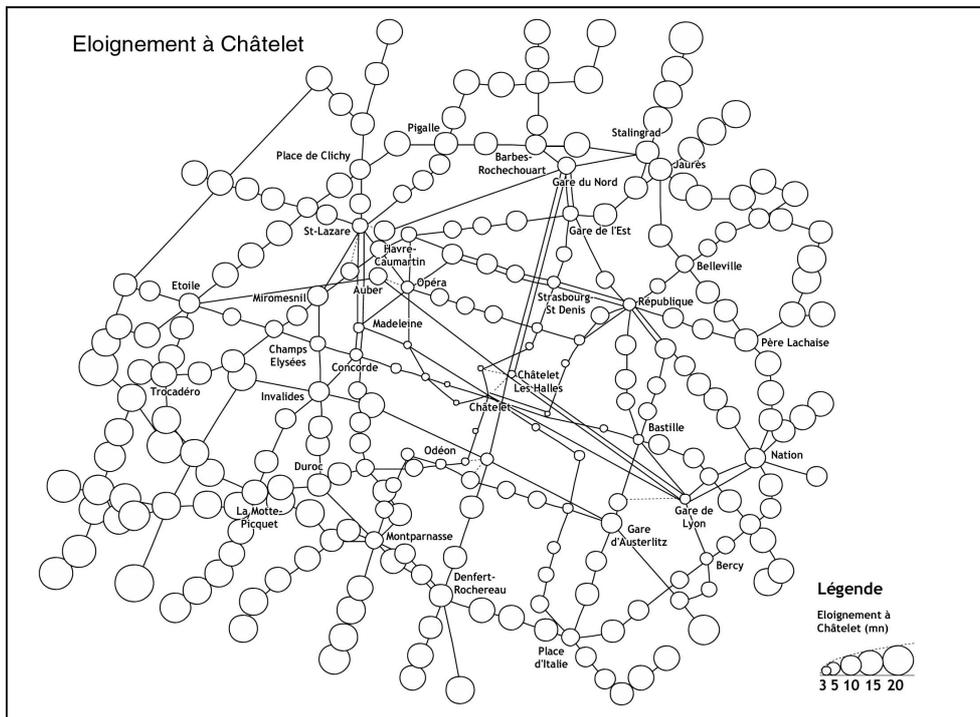
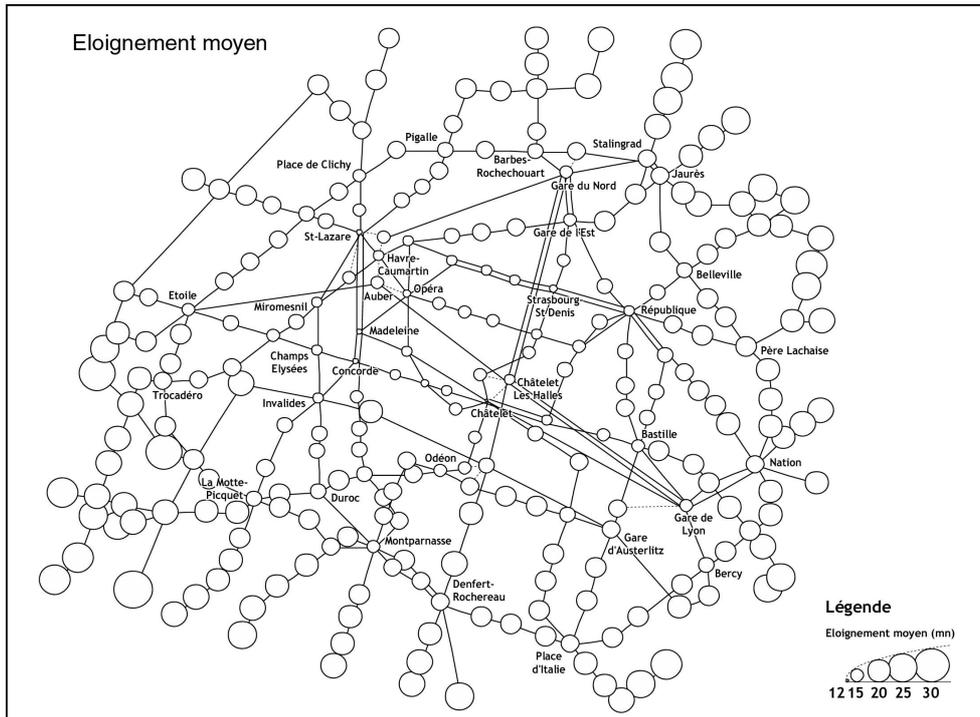


Fig. 4 Indicateurs d'éloignement (accessibilité intégrale et relative) sur le réseau de métro et RER parisien dans une logique de desserte spatiale uniforme
Distance indexes (integral and relative accessibility) on the Paris metro and RER network in a uniform spatial servicing context

Ainsi que nous l'avons vu, l'indice d'éloignement moyen donne des informations sur l'accessibilité des stations, mais les valeurs calculées sont lissées par effet de moyenne. Dans ce contexte, nous proposons d'enrichir la description de l'accessibilité en calculant les temps de parcours entre chacune des stations et la station reconnue comme étant située au centre géographique de la ville : Châtelet.

3.2.2 L'éloignement relativement à une station donnée (ou accessibilité relative) : le cas de Châtelet

Concept associé

Meilleur temps de parcours entre la station considérée et la station de référence, ici : Châtelet.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique

Information apportée

Enrichissement de la description de l'accessibilité du réseau. L'indice d'éloignement à Châtelet constitue en effet une fraction de l'indice d'éloignement moyen dont on a vu qu'il constituait une moyenne des éloignements à toutes les stations.

Ici, par le choix de la station géographiquement centrale du territoire, nous appréhendons l'efficacité du réseau en regard de la structure radioconcentrique de sa topologie.

Illustration (fig. 4)

Outre le dégradé de valeurs apparaissant naturellement autour de la station Châtelet, cet indice introduit un facteur de discrimination entre les stations des lignes radiales d'une part (stations dont l'accès au centre est favorisé, type St-Paul ou St-Germain-des-Prés) et les stations des lignes circulaires ou des lignes transversales évitant Châtelet (stations dont l'accès au centre est soumis à une correspondance, type Bourse ou Cardinal-Lemoine).

Une autre dimension de l'éloignement entre les stations spécifiquement associée aux réseaux de métro est fournie par le nombre de changements qu'il faut effectuer pour relier deux stations entre elles.

3.2.3 Le nombre moyen de changements à effectuer

Concept associé

Moyenne pondérée du nombre de changements nécessaires pour relier la station considérée à l'ensemble des autres stations du réseau. La pondération doit être représentative de la demande en déplacement choisie.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique, demande en déplacement considérée

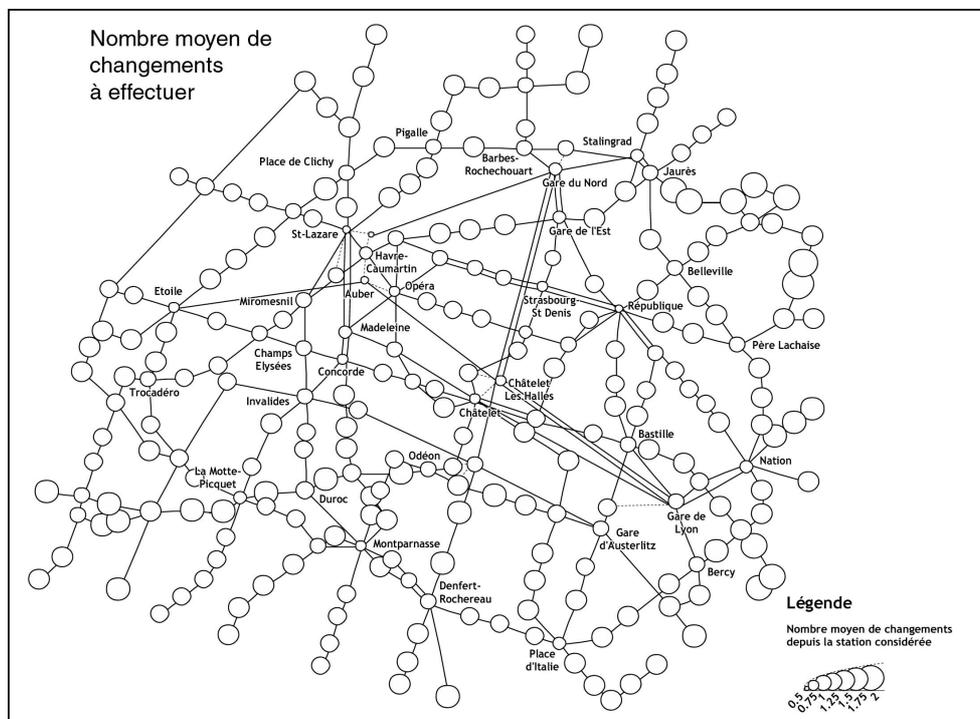


Fig. 5 Nombre moyen de changements à effectuer depuis les stations du réseau de métro et de RER parisien dans une logique de desserte spatiale uniforme
Average number of connections from the stations of the Paris metro and RER network in a uniform spatial servicing context

Information apportée

Information sur qualité de la connexion des stations à l'ensemble du réseau en termes d'évitement des couloirs de correspondances.

A un niveau agrégé, mise en évidence de la qualité de la connexion des lignes entre elles.

Illustration (fig. 5)

Au-delà d'un premier niveau de lecture permettant d'établir une hiérarchie naturelle allant des stations « bien reliées » (Saint-Lazare, Châtelet, République, Montparnasse, etc.) aux stations isolées (entre autre les stations des lignes « bis »), cet indice révèle des aspects de la dynamique de déplacements selon les lignes. Par exemple, il apparaît nettement que la ligne 10 est mal connectée aux autres lignes, à l'opposé de la ligne 1 et des lignes empruntant les grands boulevards (3, 8 et 9). De même, les scores décevants des stations Invalides et Gare d'Austerlitz dénotent la mauvaise connexion du RER C.

Afin de compléter la caractérisation des stations, nous allons intégrer des indices privilégiant l'aspect fonctionnel des composantes du réseau. Il s'agit ici de discriminer les stations en fonction du rôle qu'elle jouent en tant qu'intermédiaires du réseau pour relier les lieux du territoire.

3.3 Indices de fonctionnalité

3.3.1 La centralité intermédiaire

Concept associé

Mesure de la charge transitant par chacune des stations du réseau dans la perspective où les déplacements de la demande considérée sont effectués selon les chemins les plus rapides.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique, demande en déplacement considérée

Information apportée

Pour la demande représentative de relations dont l'origine et la destination seraient tirées aléatoirement dans l'espace, la centralité intermédiaire correspond à une densité de probabilité de fréquentation des stations dans une logique de desserte spatiale uniforme.

L'indice de centralité intermédiaire apporte des informations relatives à la dynamique du réseau. Il mesure le contrôle des relations au niveau de chacune des stations du réseau et renseigne de fait sur leur importance fonctionnelle pour le rôle de desserte assigné au réseau.

Illustration (fig. 6)

Les stations à correspondance sont valorisées par le rôle de carrefour qu'elles jouent au sein du réseau. De fait, la lecture des résultats peut être approfondie en tenant compte de la nature des stations.

D'une part, l'observation des stations simples met en évidence un effet de lignes : certaines branches du réseau ont des probabilités de transit particulièrement élevées, montrant ainsi la structuration des relations selon des axes privilégiés : par exemple les lignes 8 et 13 à l'ouest de la ville et les lignes circulaires 2 et 6.

D'autre part, l'observation des stations à correspondance complète cette analyse en mettant en relief les stations principales par lesquelles s'articulent les relations : outre les stations du quartier Auber, Châtelet et République, d'autres stations se distinguent ponctuellement sur l'ensemble du territoire, comme par exemple Montparnasse, La Motte-Picquet, Gare de l'Est, Barbès-Rochechouart ou Place de Clichy.

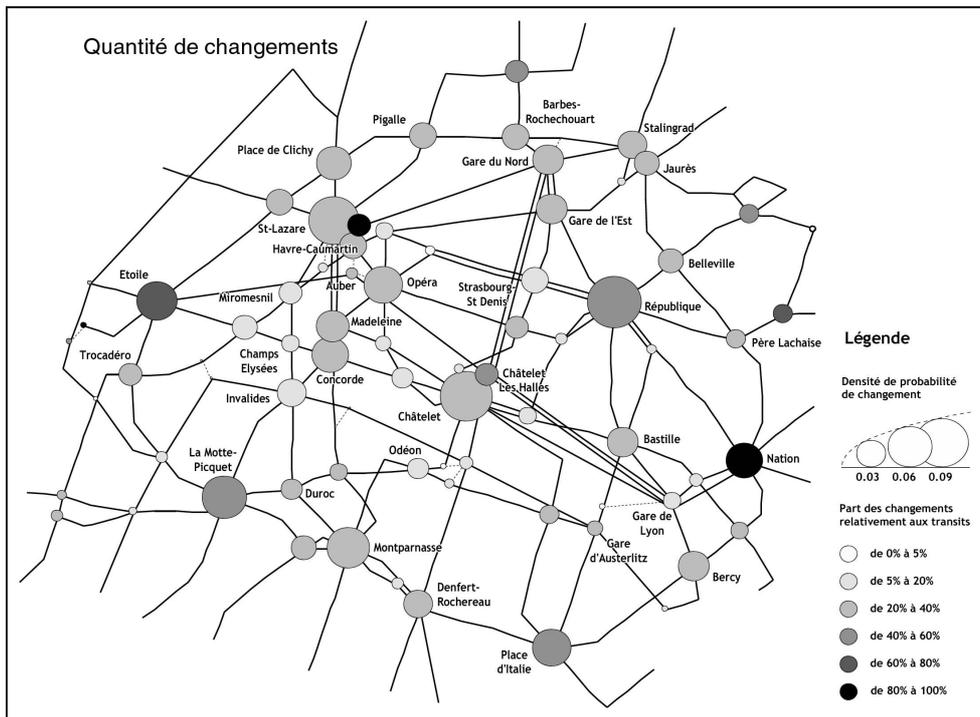
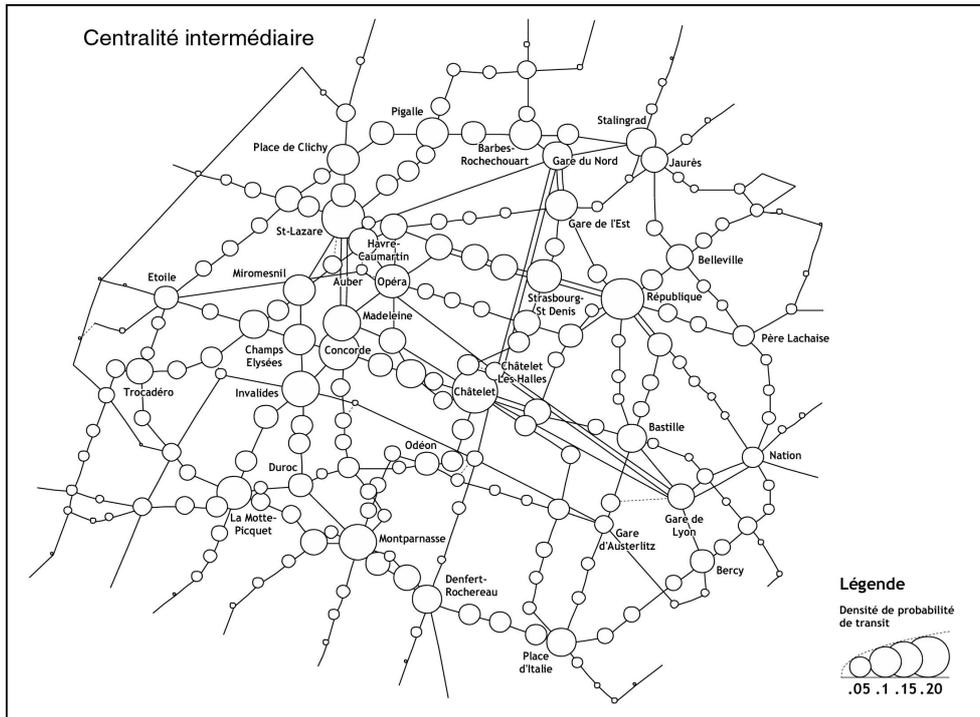


Fig. 6 Indicateurs de fonctionnalité des stations sur le réseau de métro et RER parisien dans une logique de desserte spatiale uniforme
Station functionality indexes on the Paris metro and RER network in a uniform spatial servicing context

Comme nous l'avons vu en première partie, la modélisation du réseau permet de distinguer les différents types d'arcs du réseau, à savoir les tronçons ferrés, les couloirs d'accès et les couloirs de correspondance. Les charges calculées sur le réseau peuvent donc être traitées de sorte à affiner l'analyse des transits au niveau des stations de correspondance en isolant les charges associées exclusivement aux changements de lignes (ie charges associées aux couloirs de correspondance). De cette manière, nous allons considérer un nouvel indicateur fondé sur la description des changements au sein des stations à correspondance.

3.3.2 La quantité de changements

Concept associé

Pour une station à correspondance donnée, mesure de la charge totale des couloirs de correspondance associés. Les déplacements sont conformes à la demande considérée et sont effectués selon les chemins les plus rapides.

Caractéristiques exploitées du réseau

Topologie, métrique, demande en déplacement considérée

Information apportée

Etant donné le contexte de desserte spatiale uniforme et la demande en déplacement associée, la quantité de changements correspond à la probabilité pour une relation origine-destination quelconque de faire l'objet d'un changement au niveau de la station à correspondance considérée.

Par construction, cet indice reprend dans ses grandes lignes les distinctions effectuées auparavant avec l'indice de centralité intermédiaire, mais introduit également des nuances, naturellement illustrées par le rapport entre les deux indices. Les stations pour lesquelles les changements constituent une part importante des transits seront ainsi valorisées, et inversement.

Illustration (fig. 6)

Nota bene : Par construction, la quantité de changements constitue une fraction de la centralité intermédiaire définie plus haut. Selon ce schéma, la carte des résultats présente pour chacune des stations à correspondance la quantité de changements (taille des cercles) et, à titre indicatif, la fraction de la centralité intermédiaire qu'elle représente (valeur des cercles).

Les enjeux des correspondances sur les circulaires sont soulignés ici par la revalorisation de station de la ligne 6 (Etoile, Nation, La Motte-Picquet, Place d'Italie, Montparnasse), et dans une moindre mesure de la ligne 2 (Place de Clichy, Stalingrad). A l'intérieur de la zone délimitée par les circulaires, la prépondérance des stations Châtelet et République n'est pas remise en cause. Le quartier Auber permet des correspondances au niveau essentiellement de Saint-Lazare et des stations de la ligne 8 (Concorde,

Madeleine, Opéra). Des pôles secondaires apparaissent par ailleurs sur la ligne 5 desservant l'est de la ville (Gare du Nord, Gare de l'Est, Bastille). Les autres stations, pour la plupart traversées par seulement 2 lignes, sont déconsidérées par l'indice.

4 Synthèse des résultats – classification et typologie des stations

Les indices introduits précédemment nous ont permis d'entrevoir plusieurs facettes des stations compte-tenu des caractéristiques intrinsèques du réseau et de la dynamique des déplacements. Dans cette partie, nous allons synthétiser l'ensemble des résultats afin d'établir une classification et une typologie des stations de métro dans une logique de desserte spatiale uniforme.

La première étape de cette synthèse consiste à effectuer une Analyse en Composantes Principales sur les 255 stations décrites par les 7 variables : degré (DegBrut), degré de répartition (DegRepart), éloignement moyen (EltMoyen), éloignement à Châtelet (EltChatelet), nombre moyen de changements (NbChgts), centralité intermédiaire (ProbaTransit) et quantité de changements (ProbaChgts).

Au préalable, nous avons établi la matrice des corrélations des variables (fig. 7). Cette matrice pose en premier lieu la question du comportement relatif des variables entre elles. Etant entendu que l'on attribuera intuitivement d'autant plus d'« importance » aux stations que les indices de degré et les probabilités de transit et de changements seront grands, et inversement que les indices d'éloignement et le nombre moyen de changements à effectuer seront faibles, les signes des coefficients de corrélation sont en accord parfait avec le comportement attendu des variables.

Dans le détail, les coefficients n'excèdent jamais 0.8 en valeur absolue et donnent ainsi une dimension non négligeable aux informations apportées par chacune des variables.

En pratique, les deux premiers axes factoriels de l'ACP expliquent respectivement 67,4% et 15,5% de l'information contenue dans le nuage de points. La projection des stations dans le premier plan factoriel (fig. 7) fait clairement apparaître les deux sous-populations associées aux stations à correspondance et aux stations simples.

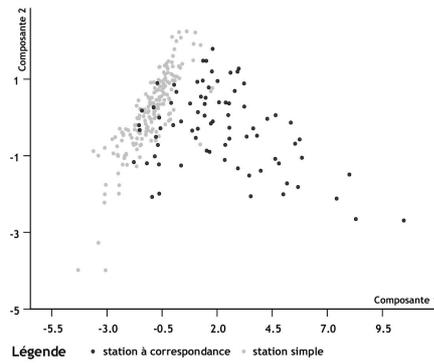
Corrélations entre les variables d'étude

	DegBrut	DegRepart	EltMoyen	EltChatelet	NbChgts	ProbaTransit	ProbaChgts
DegBrut		0,79	-0,51	-0,30	-0,62	0,79	0,72
DegRepart	0,79		-0,63	-0,24	-0,56	0,77	0,70
EltMoyen	-0,51	-0,63		0,55	0,50	-0,60	-0,41
EltChatelet	-0,30	-0,24	0,55		0,48	-0,35	-0,26
NbChgts	-0,62	-0,56	0,50	0,48		-0,62	-0,62
ProbaTransit	0,79	0,77	-0,60	-0,35	-0,62		0,75
ProbaChgts	0,72	0,70	-0,41	-0,26	-0,62	0,75	

1ère composante de l'ACP normée

$$\begin{aligned} \text{Composante1} = & 0.396 * \text{DegBrut} \\ & + 0.408 * \text{DegRepart} \\ & + 0.409 * \text{ProbaTransit} \\ & + 0.374 * \text{ProbaChgts} \\ & - 0.357 * \text{EltMoyen} \\ & - 0.305 * \text{EltChatelet} \\ & - 0.387 * \text{NbChgts} \end{aligned}$$

Premier plan factoriel de l'ACP normée



Valeurs de la 1ère composante de l'ACP normée

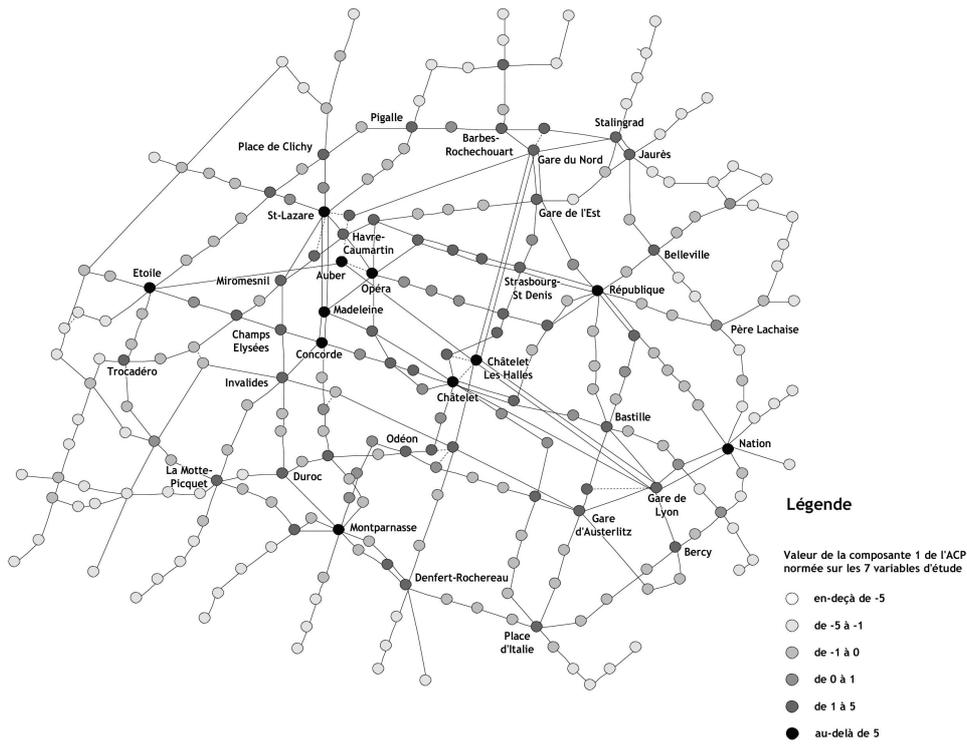


Fig. 7 Analyse statistique des 7 variables d'étude (DegBrut, DegRepart, EltMoyen, EltChatelet, NbChgts, ProbaTransit, ProbaChgts) sur la population des 255 stations
Statistical analysis of the 7 study variables (DegBrut, DegRepart, EltMoyen, EltChatelet, NbChgts, ProbaTransit, ProbaChgts) on the 255 station set

Par ailleurs, l'importance de la variance expliquée par le premier axe (67,4%), l'homogénéité des poids de la décomposition et la cohérence des signes avec le comportement relatif des variables établit la première composante comme un indicateur global de l'« importance » des stations du réseau. La carte présentée en figure 7 recense les valeurs de cette composante et constitue en ce sens une hiérarchisation globale de toutes les stations du réseau.

Un tel résumé reste cependant sommaire et ne permet pas de distinguer clairement les mécanismes expliquant les ressemblances entre stations, d'autant que sont ici mélangées les stations simples et les stations à correspondance. A ce titre, et confortés par la distinction des deux sous-populations dans le premier plan de l'ACP normée, nous allons approfondir notre travail de synthèse en distinguant les deux types de stations.

Pour la population des 174 stations simples d'une part, et pour la population des 81 stations à correspondance d'autre part, nous allons effectuer des partitions fondées sur les scores des ACP normées. La méthode de partition utilisée correspond à la procédure « PAM » (Partitioning Around Medoids) du logiciel de statistique S+ : pour un nombre k de classes donné *a priori*, la procédure cherche dans un premier temps k individus représentatifs de la structure des données (les « medoids »), puis répartit les individus en k classes autour des médoïdes par minimisation d'une somme de dissimilarités déduites des valeurs des indices.

Le partitionnement des stations simples en 5 classes est pertinent (variance inter-classes de 73%) et donne les résultats présentés en figure 8.

La partition des stations simples s'organise à première vue de manière concentrique, selon la structure globale dégagée par les indices d'éloignement (les types associés aux classes correspondent aux médoïdes issus de la procédure « PAM »). Parmi les stations les plus défavorisées se trouvent les portes (stations de degré 1, regroupées sous le type « Porte de Versailles ») et les stations très difficilement accessibles (stations avec un nombre moyen de changements élevé, regroupées sous le type « Bolivar »). Un ensemble de stations organisées autour des circulaires (type « Falguière ») partage les stations restantes en un groupe de stations centrales (type « Saint-Sulpice ») et un groupe de stations excentrées, situées sur les branches terminales des lignes (type « Convention »). L'information fournie par les autres indices permet de préciser le profil des classes. En particulier, les nuances apparaissant entre les classes centrale et circulaire font intervenir l'indicateur sur le nombre moyen de changements et mettent en valeur l'effet du centre fonctionnel autour du quartier Auber favorisant les axes du nord et de l'ouest au détriment de ceux de la rive gauche (ligne 10) ou de l'est (ligne 9).

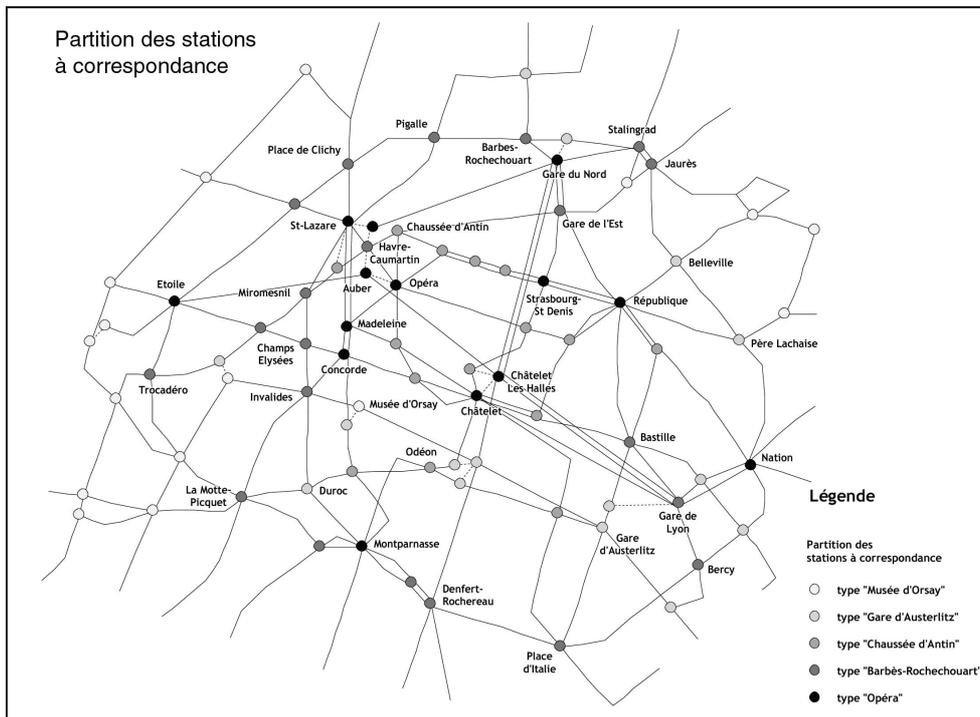
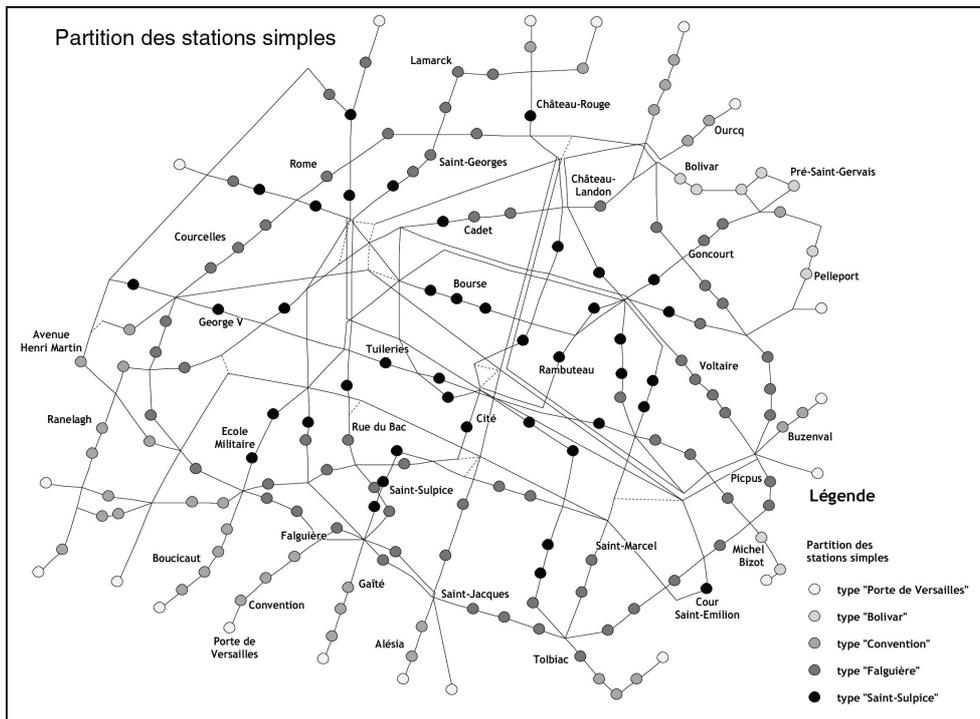


Fig. 8 Partition en 5 classes des stations simples et des stations à correspondance du réseau de métro et de RER parisien (procédure « PAM » sur les composantes de l'ACP normée sur les 7 variables d'étude)
5 class partition of the one-line station subset and of the junction station subset on the Paris metro and RER network (« PAM » processing on the standardized principal components of the PCA of the 7 study variables)

Le partitionnement des stations à correspondance en 5 classes donne également des résultats intéressants (variance inter-classes de 77%), présentés en figure 8.

La partition des stations à correspondance fait clairement apparaître une classe de stations fortement excentrées ou situées sur des lignes très mal connectées comme les lignes bis ou le RER C (stations de type « Musée d'Orsay »). A un degré moindre, une deuxième classe de stations défavorisées (type « Gare d'Austerlitz ») se dessine autour des quartiers est, de la ligne 10 et des stations à correspondances extérieures. On devine ainsi le rôle joué non seulement par l'éloignement, mais également par la logique de lignes mise en évidence par les indicateurs relatifs aux changements.

A l'opposé, la partition distingue nettement une classe de stations à correspondance « majeures », incluant les stations du « centre fonctionnel » (Châtelet, République, Madeleine, Concorde et Opéra donnant son nom à la classe) ainsi que des stations plus excentrées (Etoile, Nation, Montparnasse et Gare du Nord) en vertu de leurs scores avantageux en termes de nombre moyen de changements et de degré de répartition.

Les stations restantes se partagent en deux classes. L'une regroupe quasi-exclusivement des stations proches du centre et traversées par 2 lignes (type « Chaussée d'Antin »). L'autre regroupe des stations plus conséquentes (Bastille, Gare de Lyon, etc.) ou situées à proximité des circulaires (Bercy, Place de Clichy, etc.), jouant de fait un rôle plus important en termes de centralité intermédiaire (type « Barbès-Rochechouart »).

5 Conclusion – Perspectives

Aux yeux du voyageur qui débarque de province ou de l'étranger dans l'une des six gares parisiennes, le métro représente symboliquement la clef d'accès à l'espace parisien. De la gare à l'hôtel puis de l'hôtel à chacun des lieux visités de la capitale, le métro ponctue les déplacements en substituant aux adresses le nom des stations auxquelles elles sont rattachées.

De fait, l'espace parisien est souvent associé à son réseau de métro et met ainsi en lumière les enjeux de ce dernier en termes de desserte spatiale. A l'échelle des stations, plusieurs aspects sont à considérer dans cette perspective : la topologie locale, l'éloignement relatif aux autres stations, les pénalités induites par les changements, la fréquentation, etc. Les indices mathématiques associés permettent d'effectuer des distinctions entre les stations relativement à leur position au sein du réseau et à leur fonctionnalité pour la logique de déplacement considérée. Les résultats obtenus permettent par ailleurs de mettre en évidence des « effets de lignes » illustrant l'inégalité des tracés des lignes en termes de stratégies d'emprise et de connectivité au reste du réseau. A une échelle globale, la synthèse de ces indices fournit une classification des stations selon un critère général

d'« importance ». Un calcul de partitionnement par ailleurs aboutit en outre à une typologie des stations simples d'une part, essentiellement fondée sur des critères d'éloignement, et à une typologie des stations à correspondance d'autre part, prenant en compte non seulement l'éloignement, mais également les logiques de changements et la fonctionnalité des stations. Cette typologie met particulièrement en valeur le rôle joué par les stations du centre fonctionnel du réseau (Châtelet, Saint-Lazare, Concorde, Madeleine, Opéra, Auber, Haussmann) et un certain nombre de grosses stations jouant le rôle de pivots aux quatre coins du territoire (République et Strasbourg-Saint-Denis à proximité du centre, Gare du Nord, Nation, Montparnasse et Etoile aux quatre points cardinaux).

L'approche présentée ici relève exclusivement de la description géographique de l'espace sur lequel le réseau de métro joue un rôle de médiateur. On rejoint en ce sens les objectifs qui étaient initialement assignés au réseau lors de sa conception. A ce titre, le rôle joué par le RER est très réduit à en juger par son impact sur les résultats obtenus pour les différents indices abordés. De fait, l'étude menée ici gagnerait à être prolongée par la prise en compte d'une demande représentative des déplacements réels sur le réseau – demande pour laquelle ont d'ailleurs été conçues les lignes de RER et la ligne 14.

Dans un autre registre, la dimension cognitive du réseau abordée en filigrane dans cet article constitue une autre perspective d'approfondissement. Dans cette lignée, il serait par exemple intéressant de confronter la perception du réseau par les usagers et la réalité même du réseau traduite en termes d'anamorphoses.

Institut Géographique National
Service de la Recherche
Laboratoire COGIT
2-4 avenue Pasteur
94165 Saint-Mandé cedex
Jean-Francois.Gleyze@ign.fr

Bibliographie

Berton C., Ossadzow A., (1998), *Fulgence Bienvenüe et la construction du métropolitain de Paris*, Paris, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 224 p.

CBHM, (2001), *L'Antiséche du Métro – Quais, sorties, plans des rues et numéros, couloirs de correspondance*, Paris, Editions CBHM, 54 p.

Coroller P., (2002), *Etude des stations du métro parisien*, Paris, Dossier transversal du DESS Cartographie et SIG, Université Paris 1 – ENSG, 35 p.

Dupuy G., (1993), « Les stations nodales du métro de Paris : le réseau métropolitain et la revanche de l'histoire », *Annales de géographie*, n°569, p. 17-31.

- Freeman L., (1978), « Centrality in Social Networks – Conceptual Clarification », *Social Networks*, n°1, p. 215-239.
- Gleyze J.-F., (2003), « Fonctionnalité et vulnérabilité des réseaux de transport – Le cas du métro parisien », à paraître dans les actes de la conférence *ThéoQuant*, Besançon, 14 p.
- Lamming C., (2001), *Métro insolite*, Paris, Editions Parigramme, 178 p.
- Site non-officiel de la RATP, (2003), L’historique du métro et du RER, www.ratpinfo.net
- Site non-officiel du métro parisien, (2003), Le métro en histoire(s), membres.lycos.fr/metro
- Vie du rail et des transports (La), (19 juillet 2000), 19 juillet 1900 – 19 juillet 2000 : cent ans de métro, n°141, pp. 4-11, pp. 27-42.
- Wasserman S., Faust K., (1994), « Social Network Analysis – Methods and Applications », New York, Cambridge University Press, 857 p.