



*Co-tutelle avec l'Université de Wuhan et l'Université de Paris 8*

*Résumé de thèse*

**Étude du développement structurel de réseau  
métropolitain de Paris, et les enseignements du cas  
parisien pour le développement métropolitain  
de la ville de Wuhan (Chine)**

Doctorante: Xi Wang

Directeurs de thèse: Philippe Bonnin, Qingming Zhan

Discipline: Études urbaines, aménagement et urbanismes

Date de soutenance: 27 mai, 2016

## I. Introduction

À l'ère de l'urbanisation rapide dans les pays en développement, notre monde est aujourd'hui confronté à de nombreux défis en termes de réchauffement climatique. Notamment celui causé par l'utilisation massive des moyens de transport privés et faiblement connectés qui entraîne une explosion inévitable de la demande énergétique.

Pour y remédier, certains pays émergents ont commencé ces dernières années à privilégier la mise en place croissante et progressive de transport en commun. C'est ainsi qu'en Chine, en 2000, près de 117 km de ligne de métro avaient été construites au sein de cinq villes. Puis, en 2012, 1755 km de ligne pour seize villes, soit dix fois plus. Avec les nouveaux accords mis en place et en cours de préparation dans le pays, il est également prévu d'accélérer cette expansion dans vingt autres nouvelles villes dans les années à venir. A ce rythme, nous pouvons estimer un réseau qui devrait atteindre plus de 6000 km d'ici 2020 (The World Bank and DRC of China 2014).

Or, la construction d'un métro possède d'importants risques financiers selon les expériences internationales. Le coût de construction d'un système de métro est onéreux avec 500 millions de Yuan par km. Le coût de production pour un système de métro de 30 km atteint 1.5 milliards de Yuan, soit l'équivalent de six mois des recettes pour un gouvernement local situé dans une ville moyenne en Chine. Du fait que la taille d'une ville chinoise est souvent grande, l'échelle des réseaux de métro en Chine surpasse généralement celle des autres villes dans le monde. Les réseaux du métro de Shanghai (538 km) et de Pékin (465km) sont le deuxième et troisième plus longs du monde après celui de Séoul. Néanmoins, le développement du métro en Chine est en surchauffe. Certaines villes construisent un métro simplement parce que ce dernier est un symbole de ville moderne, même si ces villes n'ont pas le niveau fiscal ni assez de demande de trafic. Dans ce cas, il faut faire plus d'efforts pour guider le développement durable au fur et à mesure du développement du métro en Chine.

## II. Problématique

Dans le rapport de la Banque Mondiale (2010) sur le développement du transport ferré en Chine, il est indiqué que la planification est la phase la plus importante pour le développement d'un réseau de métro. C'est lors de cette phase que les décisions importantes sont en effet prises, et où l'on détermine en grande partie le métro et ses impacts. Les urbanistes doivent donner des conseils aux décideurs en matière d'infrastructure, l'intégration avec l'utilisation des sols et le système de transport, les prévisions de trafic, etc.

La prévision du trafic n'est pas une chose aisée dans la planification des systèmes de métro. La plupart des prévisions sur le nombre de voyageurs sont préparées « de bas en haut ». L'expérience internationale montre de manière incontestable que ces prévisions sont le plus souvent tout simplement invraisemblables - il y a des biais systématiques vers l'optimisme. Des lignes du métro, par conséquent, risquent d'être construites le long des routes à faible potentiel de trafic. Par exemple, la ligne 1 du métro à Wuhan a été construite le long de la ligne d'un ancien chemin de fer pour réduire les coûts de construction. Mais les volumes de trafic sont relativement faibles, compte tenu de l'importance de la population de la ville qu'elle dessert. Il est primordial de développer de nouveaux outils d'analyse pour estimer les trafics



potentiels, car ceux-ci sont des informations essentielles pour désigner l'itinéraire des réseaux ainsi que la capacité des stations du métro.

L'expérience internationale montre que les « bons » projets de métro ne se produisent pas par hasard. Au contraire, ils résultent de l'optimisation continue à partir du début de la planification, au fur et à mesure de son développement. Par exemple, la première ligne du métro de Paris a été construite en 1900. Dans son développement de plus de 100 années, le système de métro a été modifié à plusieurs reprises non seulement dans la planification (cf. tableau 1), mais aussi dans le processus de développement, y compris la fusion et l'échange de chemins entre les lignes. Cela suggère que le système de métro à Paris a été développé d'une manière « organique » - se développer et s'optimiser en s'adaptant aux besoins.

**Tableau 1 Comparaison entre projet et réalité des lignes du métro avant 1914**

<b>Ligne</b>	<b>Projet</b>	<b>Réalité</b>	<b>Raisons</b>
Ligne 2-Sud (Ligne 5)	Elle serait étendue à la station Nation.	- Étendue à la Gare du Nord - Future ligne 6 se dirige vers Nation.	Moins de trafic entre la Place d'Italie et Nation.
Ligne 5	Elle ne passe pas par la Gare de Lyon.	Pendant plusieurs mois jusqu'en Septembre 1906, la Gare de Lyon a été connectée à la ligne 5 avec une jonction.	Gare de Lyon est l'une des gares de Paris qui ont des flux de trafic de masse.
Ligne 4	Une jonction a été conçue en ligne droite pour traverser la Seine au-dessous de l'Institut de France	L'itinéraire a été changé pour traverser plus à l'est par la place du Châtelet et L'île de la cité.	L'opposition de l'Institut de France ; la nouvelle route a une plus grande cohérence avec les grands courants de trafic.

### III. Objectifs de recherche

La Chine est dans les premiers stades de son développement métropolitain et les études faites sur ce sujet sont encore peu nombreuses. L'expérience internationale pertinente doit être mieux analysée et diffusée de manière plus systématique afin que nous puissions en tirer des leçons. Ce ne sera seulement qu'après l'avoir bien étudiée que nous pourrons à la fois construire des réseaux de métro, mais aussi assurer leurs contributions vers un développement durable.

Le but global de la recherche est d'étudier les caractéristiques structurelles du réseau métropolitain à Paris et son évolution afin de donner des suggestions au développement du métro de Wuhan.

Pour atteindre ce but, des sous-objectifs plus spécifiques sont formulés ainsi :

- 1) Étudier l'évolution du réseau du métro parisien et ses changements au long de son développement;
- 2) Appliquer l'analyse de *centralité* dans des cas d'étude avant et après des changements interne au réseau;

- 3) Appliquer l'analyse de *centralité* au réseau actuel du métro parisien;
- 4) Identifier la corrélation entre les coefficients de *centralité* et la densité du trafic entrant des stations de métro à Paris;
- 5) Créer et analyser des modèles simples de métro ainsi que des modèles du métro parisien;
- 6) Appliquer l'analyse de *centralité* au réseau actuel et à des projets de métro à Wuhan;
- 7) Proposer et analyser des projets optionnels pour le métro de Wuhan afin de donner des conseils sur son développement prospectif.

#### IV. Cas d'étude

##### 1. Réseau métropolitain de Paris

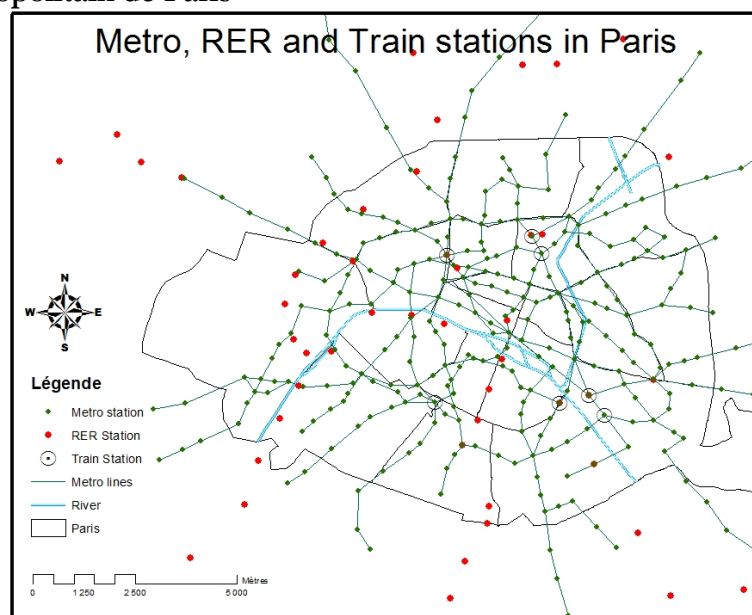


Figure 1 Le réseau de métro parisien en 2013

Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données Open Data RATP

La première ligne du métro parisien avait été construite pour desservir l'Exposition Universelle en 1900. Après plus d'un siècle de développement, il a eu un impact significatif sur la structure de la ville, l'accessibilité et le quotidien des parisiens. 214 km de lignes souterraines sont partagés par 16 lignes (cf. figure 1). L'histoire a montré que la construction du métro parisien n'a pas été faite au hasard, mais qu'elle est le résultat d'un travail progressif et continu d'optimisation de la planification depuis plus de 100 ans. En effet, le réseau n'a cessé d'être modifié pendant et après les travaux de planification : fusion ou re-aiguillage de lignes, etc. en fonction du besoin. Le métro parisien s'est développé d'une manière « organique » : adaptation aux besoins et optimisation progressive.

Le métro parisien est également intégré avec le RER (Réseau Express Régional d'Île-de-France). Avec la même carte de transport ou un billet du métro, les voyageurs peuvent se déplacer librement entre le métro et le RER. Différent du métro, le RER est conçu principalement pour faire des trajets entre Paris et sa banlieue. Il a une plus grande distance moyenne entre deux stations que le métro (2 km).

Dans cette recherche, le réseau RER n'est pas pris en considération. Cependant, comme il y a des échanges de flux importants aux correspondances de métro et RER, l'influence de ces stations de RER est aussi prise en considération. La base de données SIG de cette étude a été créée à partir des données publiques « Open Data » publiées par la Régie Autonome des Transports Parisiens (RATP 2013).

## 2. Réseau métropolitain de Wuhan

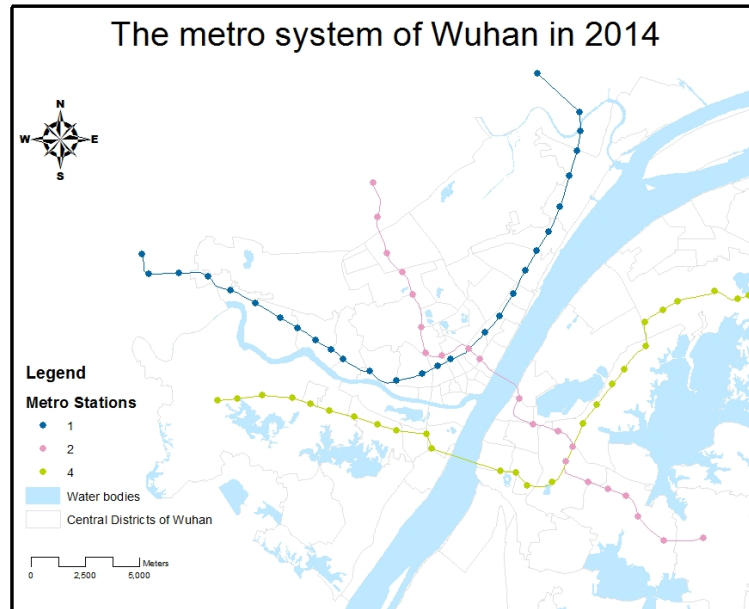


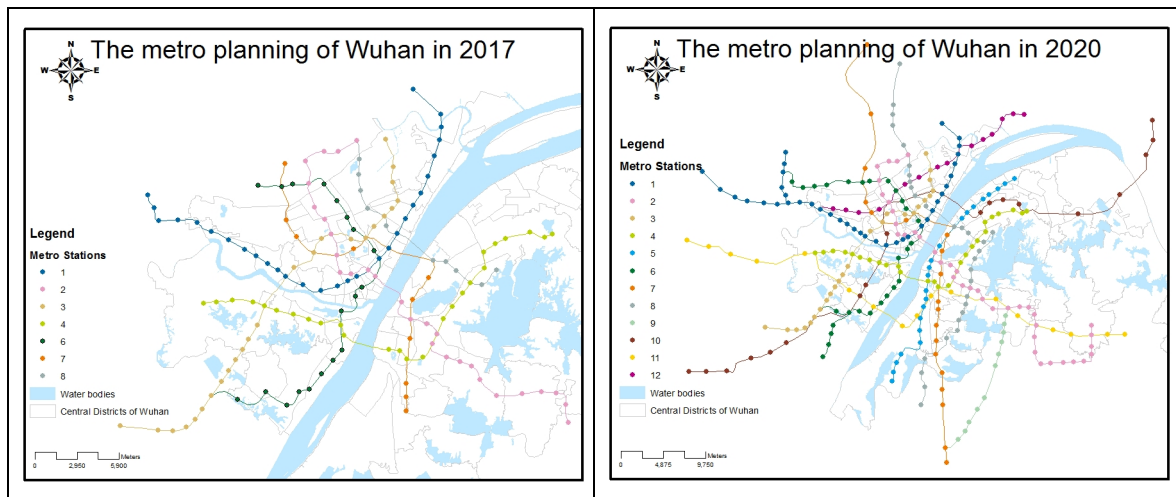
Figure 2 Le réseau actuel de métro de Wuhan, dessiné sous ArcMap ©X. Wang

Wuhan est la cinquième ville en Chine à posséder un métro après Pékin, Tianjin, Shanghai et Guangzhou. Elle est la sixième plus grande ville de Chine avec une population de 10.2 millions d'habitants. Son opération avait été lancée en 2004 (cf. figure 2). En 2014, les lignes 1 et 2, ainsi qu'une partie de la ligne 4 ont desservi 62 stations sur près de 73.4 km.

Selon la planification du système de métro de Wuhan, sept lignes d'une longueur totale de 215,3 km, devraient pouvoir être mises en service avant 2017 (cf. tableau 2). Le réseau de métro couvrira les districts centraux de Wuhan. Selon des statistiques officielles, 66% de la population devrait pouvoir accéder aux stations de métro à moins de 600 m à pied (Paris est accessible dans une distance de 500m depuis des stations de métro). Le système de métro partagera 35% du flux des voyageurs des transports publics à Wuhan.

Tableau 2 Projets du système de métro à Wuhan  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang

Projet 2017	Projet 2020
-------------	-------------



La planification du métro à Wuhan vise à relier trois bourgs de Wuhan séparés par le grand fleuve Yangtze et la rivière Han, à accueillir l'augmentation du trafic intérieur et fournir des services à des villes satellites. Un projet à long terme prévoit que le métro de Wuhan va exploiter 25 lignes, dont 12 lignes de métro et 13 lignes d'express au niveau régional avec une longueur de 860 km.

### 3. Base de données

Le tableau 3 présente des données SIG sur Paris et ses sources. Parmi lesquelles, des données sur le réseau actuel de métro et RER, ainsi que de trafic entrant des stations selon l'Open Data sur le site internet de RATP & SNCF. Ses attributs comprennent nom, date d'ouverture, correspondances, etc. Le réseau routier de Paris est tiré des fichiers .shape de la BD TOPO de l'IGN. Le reste, c'est-à-dire les données sur les zones administratives et les rivières a été téléchargé depuis le site d'OpenStreetMap (OSM).

Tableau 3 Base de données SIG sur Paris

Donnée	Attributs	Source de données
Gares	Nom, date d'ouverture, correspondances	Crée selon Google Map
Réseau de métro actuel	Coordonnée, nom, ligne, date d'ouverture, correspondances	Crée selon RATP Open Data
Réseau de métro historique	Ligne, date d'ouverture, longueur, nombre de station	Crée selon des documents historiques
Réseau RER	Nom, ligne	Crée selon RATP & SNCF Open Data
Trafic entrant	Nom de station, trafic entrant	Crée selon RATP Open Data
Réseau routier	Nom, type	Données IGN
Aires	Nom	Open Street Map (OSM)

administration		
Rivière	Nom	Open Street Map (OSM)

Les données SIG sur Wuhan ont été créées principalement à partir des documents présents sur les sites officiels (cf. tableau 4). Par exemple, les données sur le réseau actuel et les projets de métro ont été créées à partir des cartes du site de Wuhan Land Resources and Planning Bureau. Par contre, les données sur le réseau routier, les zones administratives et les rivières et lacs ont été obtenues en contactant directement le bureau de Wuhan Land Resources and Planning.

Tableau 4 Base de données SIG sur Wuhan

Donnée	Attributs	Source de données
Gares	Nom, date d'ouverture, correspondances	Crée selon Google Map
Réseau de métro actuel	Coordonnée, nom, ligne, date d'ouverture, correspondances	Crée selon carte de la planification sur le site de Wuhan Land Resources and Planning Bureau <a href="http://www.wpl.gov.cn/">http://www.wpl.gov.cn/</a>
Projets du réseau de métro	Nom, date d'ouverture, longueur	Crée selon carte de la planification sur le site de Wuhan Land Resources and Planning Bureau <a href="http://www.wpl.gov.cn/">http://www.wpl.gov.cn/</a>
Réseau routier	Nom, type	Wuhan Land Resources and Planning Bureau
Aires administration	Nom	Wuhan Land Resources and Planning Bureau
Rivière et lac	Nom	Wuhan Land Resources and Planning Bureau

## V. Méthodologie

Dans cette recherche, le coefficient de *centralité* sera adapté pour étudier des réseaux de métro. Nous allons présenter dans des sections suivantes le concept, ainsi que la méthode d'analyse de *centralité*.

### 1. Conception habituelle de la *centralité*

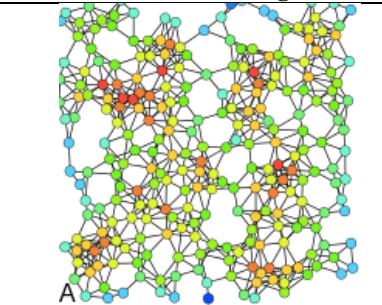
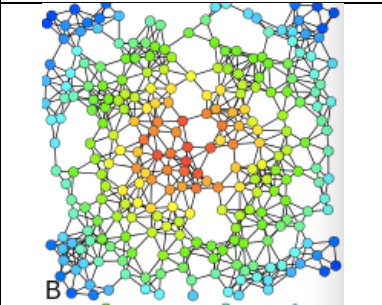
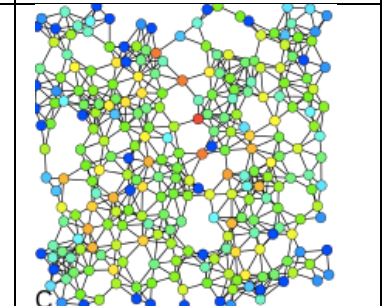
W. Christaller (1975) définit tout d'abord la *centralité* comme « la propriété conférée à une ville d'offrir des biens et des services à une population extérieure ». Cette conception de la *centralité* met en avant la relation entre les services et les personnes. M. Castells (1972) précise ensuite cette définition en définissant la *centralité* comme

« la combinaison à un moment donné d'activités économiques, de fonctions politiques et administratives, de pratiques sociales, de représentations collectives, qui concourent au contrôle et à la régulation de l'ensemble de la structure de la ville ». Ici, la ville est mise au centre des activités. F. Choay (1988) ajoute enfin à cette définition la notion d'accessibilité. Pour elle, la *centralité* « dépend du pouvoir d'attraction ou de diffusion de cet élément qui repose à la fois sur l'*efficacité* du pôle central et sur son accessibilité. L'élément peut être un centre urbain, un équipement polarisant plus spécialisé (centre commercial, culturel, financier, administratif, etc.). L'accessibilité est une condition majeure.». Cette dernière définition est celle que nous connaissons lorsque nous parlons de ville moderne où l'accessibilité est donnée essentiellement par le réseau routier et les transports en commun.

## 2. La *centralité* basée sur la théorie des graphes

Le concept de *centralité* est apparu dans les années 1950 en sciences sociales afin de mesurer l'influence qu'avait un individu dans son réseau personnel (Newman 2010). En théorie des graphes et en analyse des réseaux, la *centralité* d'un vertex mesure son importance relative dans un graphe. Plus tard, ce concept a été adapté pour l'analyse des configurations spatiales, par exemple l'importance d'une chambre dans un bâtiment, ainsi que la fréquence d'usage d'une voie dans un réseau urbain.

Tableau 5 Les indicateurs de *centralité* traditionnelles

L'indicateur <i>Degree</i>	L'indicateur <i>Closeness</i>	L'indicateur <i>Betweenness</i>
		

Source : Wikipédia "*Centralité*": <http://en.wikipedia.org/wiki/Centrality>. Juin 2013.

Les nœuds ayant le plus de poids sont en rouge

Les indicateurs utilisés traditionnellement en théorie des graphes pour déterminer la *centralité* sont : *Degree*, *Closeness* et *Betweenness* (cf. tableau 5). Tout d'abord, l'indicateur *Degree*, qui est le plus simple. Il indique simplement le nombre de connections d'un nœud. Ensuite, l'indicateur *Closeness* indique la distance moyenne d'un point aux autres points d'un graphe. Cette distance est exprimée en nombre d'arêtes à traverser. Cet indicateur n'indique souvent que le centre géographique du réseau. Enfin, l'indicateur *Betweenness* indique le nombre de passages des chemins minimaux entre deux points et passant par le nœud. C'est-à-dire la position centrale de ce nœud, et à posteriori, la vulnérabilité de la structure du réseau si ce nœud est supprimé.

Cette notion de *centralité* a été appliquée dans les années 80s et 90s sur des réseaux de transport en commun pour étudier la robustesse de ces derniers. L'indicateur de *centralité Betweenness* a été dès lors le plus souvent utilisé : S. Derrible (2012) a étudié l'évolution de la *centralité* à l'aide de cet indicateur sur des métros internationaux de différentes tailles. Il a noté que la distribution du coefficient était plus équilibrée sur

l'ensemble du réseau lorsque la taille de ce dernier augmentait. J. Zhang et ses confrères (2013) ont également utilisé cet indicateur pour analyser des caractéristiques topologiques des réseaux urbains. Ils ont constaté que le coefficient moyen pour un réseau ferré urbain se situait entre 2 et 2.45 et que ce coefficient augmentait avec le nombre de stations.

### 3. Nouvelle méthode *centralité* de « *Structuralité* »

Dans la vie quotidienne, nous pouvons remarquer que lorsque nous souhaitons aller à un endroit, nous préférons en général prendre le chemin « le plus simple » plutôt que le plus court.

Ph. Bonnin (2013) indique : « Dans la représentation du réseau, et aussi dans sa transmission orale, on cherche ainsi à minimiser le nombre de tournants qu'il faut ou faudra opérer. Par exemple, pour indiquer à un interlocuteur le chemin demandé, un habitant va essentiellement indiquer le chemin 'le plus simple', c'est-à-dire celui qui compte le moins de tournants, même si ce n'est pas le chemin le plus court en distance euclidienne. »

L'indicateur *Structuralité* consiste ainsi à mettre en évidence la distance « la plus simple » à parcourir pour arriver à sa destination, c'est-à-dire la distance à parcourir avec le moins de tournant à réaliser pour y arriver.

Introduit par Th. Courtat (2011), cet indicateur a été utilisé pour analyser des réseaux routiers en le comparant avec les indicateurs traditionnels de *Closeness* et *Straightness*. Il a permis de mettre en évidence les zones déficientes des réseaux routiers. L'indicateur « *Structuralité* » a permis de représenter de façon hiérarchique la structure de la ville en soulignant les rues principales et les anciennes enceintes. Dans la suite du texte nous utiliserons le terme « *Centralité Structuralité* » et même « *Centralité* » en résumé.

A.Perna (2011) utilisa cet indicateur pour analyser le réseau à Venise (cf. figure 3)





Figure 3 : Utilisation de l'indicateur Structuralité pour l'analyse des réseaux routiers et fluviaux à Venise, ©A. Perna

De gauche à droite, les images représentent le réseau routier, le réseau fluvial, et les deux réseaux superposés. Le réseau fluvial est considéré comme un réseau topologique. En visualisant ces images, nous pouvons constater que le réseau routier ne permet pas tout à fait de distinguer la *centralité* de la ville. Par contre, lorsque les deux réseaux sont superposés, nous pouvons mieux comprendre comment s'est construite la ville. Cela montre ainsi que la ville s'est construite à partir de ces deux réseaux.

Comme pour le réseau routier, la notion de « distance topologique » est aussi essentielle pour étudier les réseaux de métro. Toute personne se trouve quotidiennement dans une zone limitée quelque soit son profil à moins qu'il n'utilise un moyen de locomotion pour se déplacer : le métro par exemple. Pratique, puisqu'une fois arrivé à une station, il n'a qu'à s'installer et attendre d'arriver à sa destination. Pour un même prix il peut atteindre n'importe quel point sur la ligne en restant assis.

Avec l'augmentation des lignes et des interconnexions, l'espace atteignable s'est agrandi aux prix d'une préoccupation nouvelle, celle du changement de ligne, opération plus complexe à opérer que d'attendre assis pour arriver à sa destination. Cette préoccupation est très visible chez les touristes qui ont l'habitude de compter les stations restantes avant leur correspondance. On voit donc bien que la structure topologique prend le dessus par rapport à l'étendue du réseau (nombre de stations).

La *centralité* des stations de métro  $M_0$ , soit  $C(M_0)$ , se calcule avec les « distances en nombre de changements » pour atteindre toutes les autres stations  $M$ , soit  $Ordre(M/M_0)$ . En sommant sur toutes les stations on a la distance de la station de départ au reste du réseau, et en divisant par le nombre de stations cela donne le nombre de changement moyen  $D$  pour aller de cette station  $M_0$  à toutes les autres stations :

$$D(M_0) = (1/N) \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

Plus le nombre de changement moyen est faible plus la station est « centrale ». On définit donc la *centralité* comme l'inverse de cette distance :

$$C(M_0) = 1/D(M_0) = N / \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

Si l'on moyenne sur toutes les stations la distance moyenne  $D(M_0)$  on obtient la distance moyenne  $D_m$  pour aller de n'importe quelle station à n'importe quelle autre :



$$D_m = (1/N) \sum_{Stations M_0} C(M_0) = (1/N^2) \sum_{Stations M_0} \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

Plus le réseau est « efficace » et plus cette distance moyenne est petite, Pour montrer cette *efficacité* dans le sens « normal » on prend donc l'inverse de cette distance pour avoir une *efficacité* meilleure quand la valeur de E est plus grande:

$$Eff = 1/D_m = N / \sum_{Stations M_0} D(M_0) = N^2 / \sum_{Stations M_0} \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

Dans cette normalisation on divise par le nombre de stations total, sans enlever les stations sur la ligne considérée (de distance zéro). Cela fait que les distances moyennes peuvent être inférieure à 1, et l'*efficacité* globale peut être supérieure à 1.

L'indicateur d'*efficacité* pourrait évaluer un réseau de métro en terme du changement moyen nécessaire. Bien entendu, il y a beaucoup plus d'aspects, ainsi que d'indicateurs différents pour mesurer au quel niveau un réseau de métro est efficace.

Nous pouvons distinguer deux cas (cf. figure 4) :

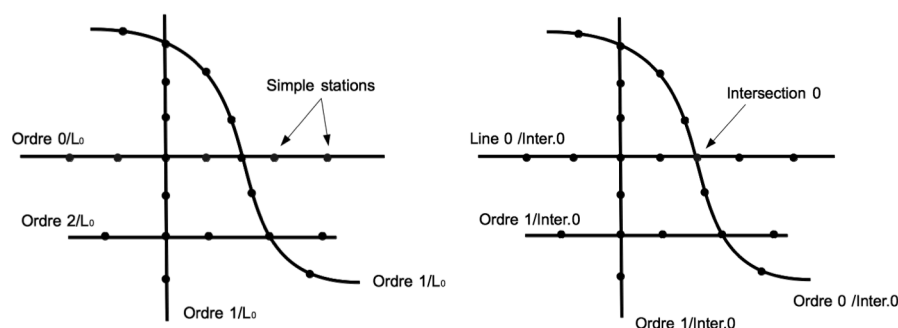


Figure 4 Deux types de *Centralité* Structuralité

- Dans le premier cas, la station est simple et se trouve sur la ligne. Toutes les stations de cette ligne ont la même *centralité*.
- Dans le second cas, la station est une correspondance, la distance est alors calculée comme la plus petite distance aux lignes qui se croisent à l'intersection.

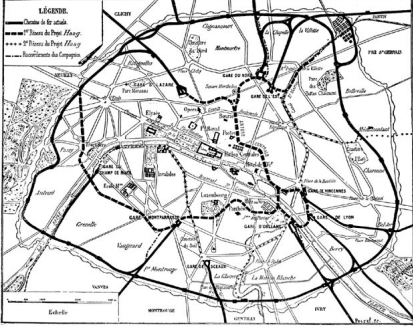
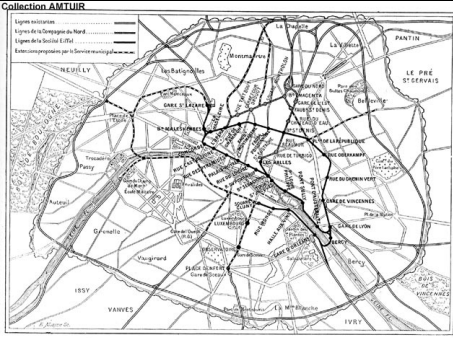
Il est essentiel de comprendre l'évolution de *centralité* des stations de métro. En effet, en mesurant la *centralité* des stations, la distribution des flux des passagers pourrait être conçue de façon plus équilibrée. De plus, elle pourrait être adaptée pour développer des outils pour estimer le nombre de voyageurs d'une nouvelle ligne du métro. Après tout, la mission du transport en commun n'est pas seulement d'emmener le voyageur vers sa destination, mais également de le faire avec le moins de temps possible, et pour cela en réduisant par exemple les correspondances.

## VI. Analyse sur le développement métropolitain de Paris

### 1. Développement du métro parisien

Il y a eu depuis 1845, deux projets du réseau de métro parisien. L'État et de grandes entreprises ont proposé de construire un réseau qui pourrait connecter plusieurs gares dans Paris afin de permettre aux trains de banlieue d'entrer dans la capitale. Cependant, la ville de Paris souhaitait développer un réseau de métro qui répondrait à la demande grandissante du trafic intra-muros.

**Tableau 6 Le projet initial du métro parisien, © AMTUIR**  
**Projet Haag en 1881** **Projet Eiffel en 1891**

 <p>Collection AMTUIR Projet Haag.</p>	 <p>Collection AMTUIR</p>
<p>Exemple du projet du gouvernement central visant à connecter des chemins de fer régionaux.</p>	<p>Exemple du réseau de dessert l'intra-muros avec faible connections aux gares parisiennes.</p>

Entre 1856 et 1890, plus d'une dizaine de projets de métro ont été proposées, sans qu'aucun soit réalisé (cf. tableau 6). Ce ne sera qu'en 1895, le 22 novembre, que le projet de métro de la municipalité de Paris a été approuvé : un réseau qui ne dépasserait pas les portes de Paris serait construit pour des intérêts locaux plutôt que régionaux.

En 1896, la municipalité de Paris propose un projet visant à « renforcer et améliorer des services de transport en commun dans des zones de lacune et avec une population relativement faible ». Le projet initial comprend quatre lignes de métro qui forment d'une part un cercle à l'intérieur de la ville et d'autre part des lignes parallèles ou perpendiculaires à la Seine (cf. figure 5). Ce projet représente le fondement du réseau actuel de métro parisien, qui compte actuellement 16 lignes et 303 stations.



**Figure 5 Projet initial (1896) adapté du réseau de métro parisien, © AMTUIR**

Les travaux de construction de la première ligne de métro débuteront le 30 mars 1889. Sa mise en fonction initialement prévue en février 1899 pour desservir l'exposition mondiale en 1900, sera réalisée avec trois mois de retard. Au début des années de construction, la méthode appliquée était en général en tranchée couverte,

c'est pourquoi les premières lignes de métro courent souvent sous de grandes avenues parisiennes.

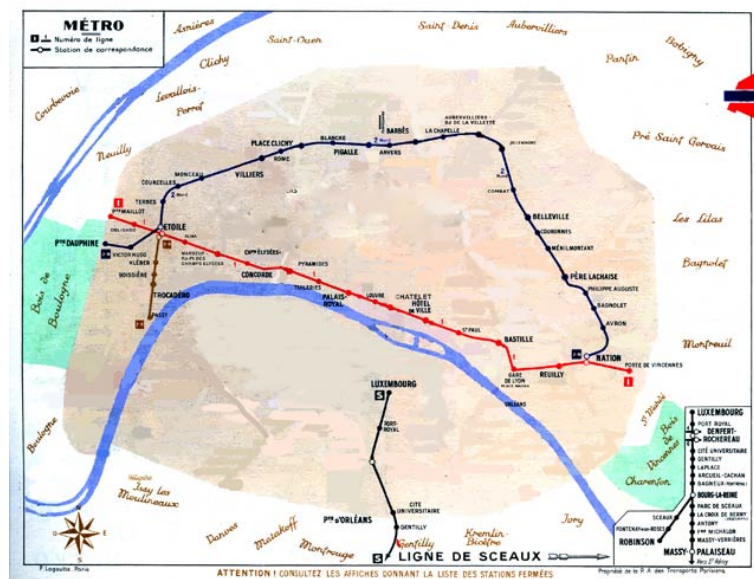


Figure 6 La ligne 1 et la ligne 2 de métro parisien en 1903, © AMTUIR

Le projet de la ligne 1, en 1896, devait initialement relier Porte de Vincennes à Porte Dauphine (cf. figure 5), mais fut finalement dirigée vers Etoile. Les ingénieurs, à l'époque, avaient estimé que cette ligne pourrait être utile à un plus grand nombre de voyageurs aux environs de la Porte Maillot. En effet, le 16ème arrondissement était alors un quartier en cours de construction, considéré loin du centre ville. Ce sera finalement la ligne 2, qui assurera la *connexion* de Porte Dauphine et Etoile. Inaugurée le 2 avril 1903, elle relie Porte Dauphine à Nation (cf. figure 6).

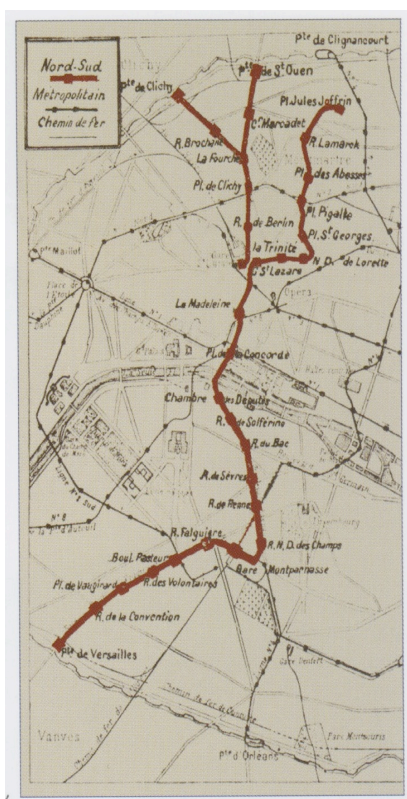
Entre 1904 et 1910, la construction du réseau métropolitain à Paris est accélérée. La ligne 3 est la deuxième ligne de métro à être construite en parallèle à la Seine. Cette ligne traversait des quartiers avec des grands magasins et des marchés, afin de répondre à une demande assez importante en terme de trafic.



**Tableau 7 La changement de la direction sur ligne 5, © AMTUIR**

Réseau de métro parisien le 14 juillet 1906	Réseau de métro parisien le 17 septembre 1906
<p>Service existait entre Place Mazas (Quai de la râpée) et Gare de Lyon sur la ligne 5.</p>	<p>Ligne 5 contournait Gare de Lyon et se dirigeait vers Gare du Nord.</p>

La ligne 5, est mise en service jusqu'à la station Place Mazas (aujourd'hui Quai de la râpée) le 13 juillet 1906. Plus tard, une section supplémentaire prolongera la ligne de Place Mazas à Gare de Lyon, jusqu'au 17 septembre 1906. Le tracé est alors modifié pour diriger l'extension de la ligne 6 depuis Place Mazas jusqu'à Gare du Nord (cf. tableau 7). Aujourd'hui encore, le fait de ne pas desservir la Gare de Lyon reste un handicap pour cette ligne.



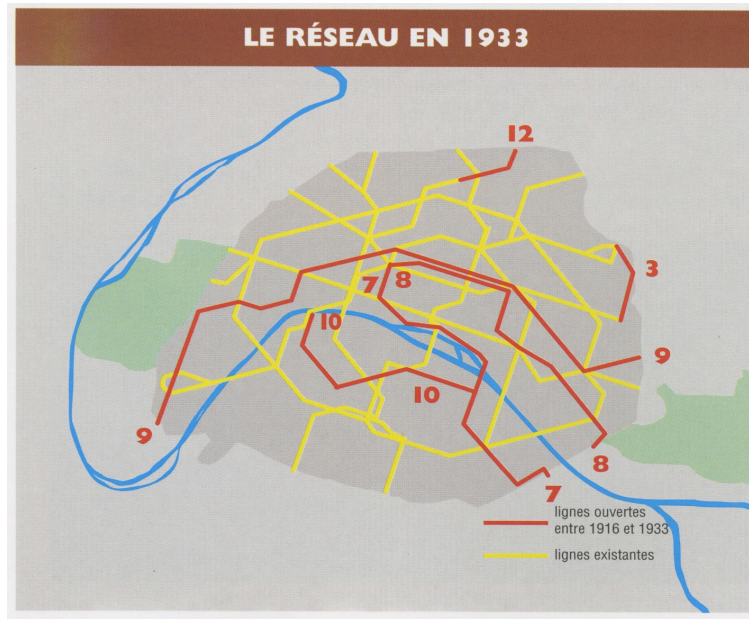
**Figure 7 Projet initial de la ligne A et ligne B, © J. Tricoire**

Jean-Baptiste Berlier, un ingénieur des Mines a inauguré la Compagnie du Chemin de Fer Electrique Nord-Sud avec concession de construction pour trois ligne : ligne A, ligne B et ligne C. Nord-sud a commencé par des travaux sur deux lignes (cf. figure 7), dont la ligne A, tracée sur un itinéraire assez sinueux et compliqué à construire. Elle est mise en service le 30 octobre 1912, entre Porte de Versailles et Jules Joffrin en passant par Montmartre. On en inaugure un nouveau tronçon le 26 février 1911 entre Saint-Lazare et Porte de Saint-Ouen, et puis un autre le 20 janvier 1912 entre La Fourche et Porte de Clichy.

Du fait de la mobilisation en 1914 au début de la première guerre mondiale, les lignes 2, 6 et 8 sont totalement arrêtées, ainsi qu'une partie des lignes 5 et 7. 106 stations sur 169 sont alors fermées. Le service fut rétabli petit à petit à partir du 18 octobre 1914, assuré par des travailleurs féminins intérimaires. Bien qu'affecté par la guerre, la Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris (CMP) a prolongé la ligne 7 jusqu'à la station Palais Royal depuis Opéra le 1 juillet 1916. Le 23 août de la même année, le Nord-Sud met en service le nouveau

tronçon de la ligne A reliant Jules Joffrin à Porte de la Chapelle.

Après la guerre, le coût de la vie à Paris augmente de manière significative, alors que le niveau des salaires stagne. Ces facteurs poussent la classe moyenne parisienne à se loger en banlieue et dans des quartiers moins onéreux. Ils passent, par conséquent, beaucoup de temps dans les transports en commun. Si l'on observe la distribution du flux des voyageurs, il semble que, après la guerre, des heures de pointes émergent le matin de la banlieue en direction du centre ville, et le soir du centre ville vers la banlieue.



**Figure 8 Des sections de métro mise en service entre 1916 et 1933, © J. Tricoire**

La figure 8 présente des sections de ligne de métro construit entre 1916 et 1933. La construction de la ligne 8 et la ligne 9 en parallèle sous les Grands Boulevards a été, semble-t-il assez complexe. Dans le projet de la ligne 10 au début des années 1900, elle est désignée comme la *Ceinture intérieure des Invalides aux Invalides*, mais sa construction fut reportée à cause de la guerre. Après avoir vu son tracé modifié à plusieurs reprises, elle sera ouverte au début de l'année 1930, et reliera finalement Invalide à Porte de Choisy. Mais du fait de la faible fréquentation, la section Jussieu-Porte de Choisy est intégrée à la ligne 7 le 3 juin, 1930.

La population de la banlieue parisienne passe de 956.000 habitants en 1901 à 2.062.000 en 1931, une partie des parisiens ayant déménagé petit à petit vers la périphérie et la banlieue. L'augmentation de la densité de la population dans les quartiers suburbains et des migrations domicile-travail rendent alors nécessaire un service de métro parisien, et le CMP engage l'extension des lignes de métro vers la banlieue parisienne.



La figure 9 illustre l'extension des lignes mise en service entre 1934 et 1942. Une nouvelle ligne numérotée 11 est construite durant cette période, et les lignes 8, 10 et 14 (ligne 13 actuelle) sont modifiées.

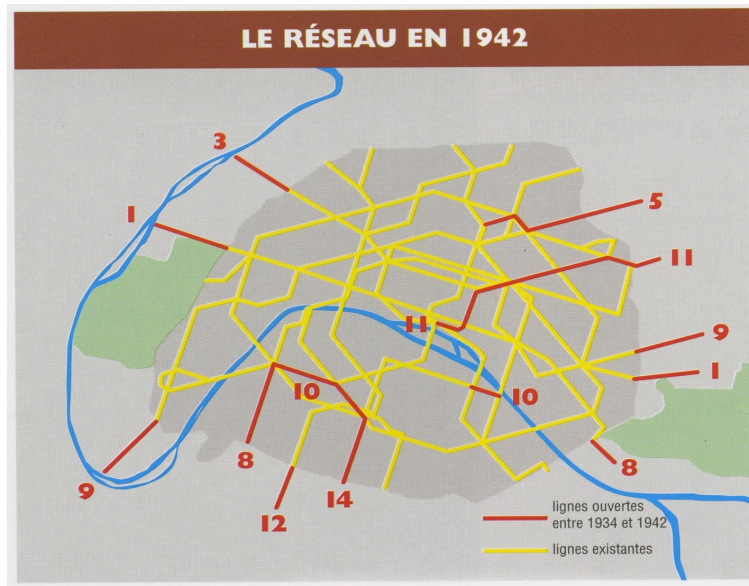


Figure 9 Des sections de métro mise en service entre 1934 et 1942, © J. Tricoire

Entre 1946 et 2000, des travaux sur le réseau de métro sont principalement en banlieue parisienne (cf. figure 10). Dans Paris, la nouvelle ligne 14 baptisée projet Meteor (Métro Est-Ouest Rapide) est inaugurée le 15 octobre 1998 entre Madeleine et Bibliothèque François-Mitterrand. C'est la première ligne de métro parisien à conduite automatiquement.

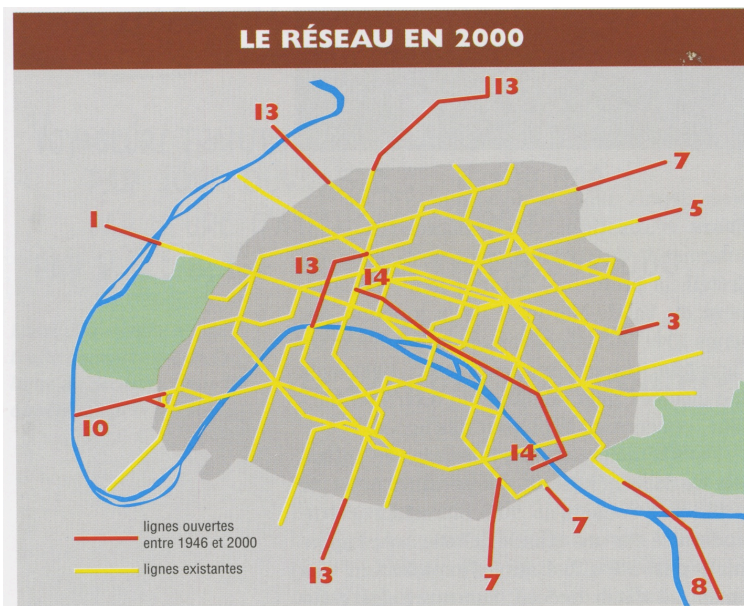
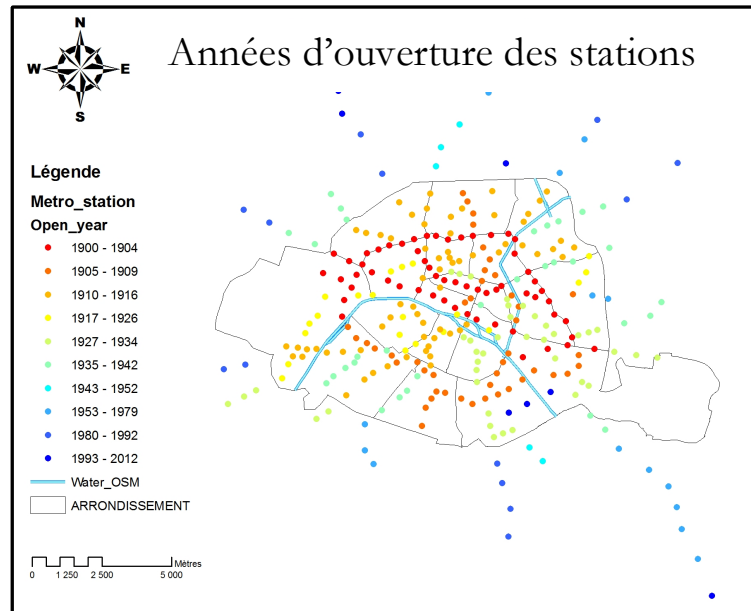


Figure 10 Des sections de métro mise en service entre 1946 et 2000, © J. Tricoire

Enfin, la figure 11 indique la date d'ouverture des stations de métro parisien : les stations les plus anciennes sont en rouge, les plus récentes en bleu. Selon ce schéma, les stations les plus anciennes constituent la structure fondamentale du réseau de métro parisien. Ensuite, on construit d'autres stations qui viennent s'ajouter petit à petit dans Paris. Enfin, les lignes les plus récentes s'étendent vers la banlieue. En général, les stations côté rive droite sont plus anciennes que celles de la rive gauche. La ligne de métro la plus récente dans Paris intra-muros est la ligne 14.



**Figure 11 Des dates d'ouverture des stations du métro parisien**  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données Open Data RATP

## 2. Analyses sur des évolutions importantes dans le développement du métro parisien

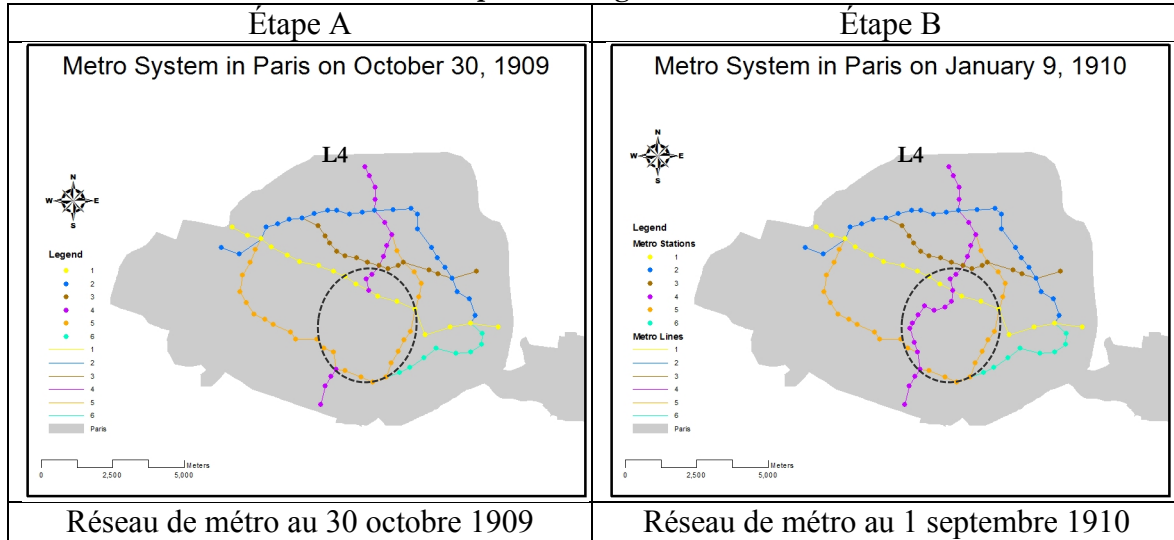
Pour mieux comprendre l'impact des modifications sur le réseau du métro parisien le long de son développement, nous avons choisi quatre cas d'étude en deux étapes : avant et après des modifications. Pour chaque cas d'étude, nous analyserons la *centralité* des stations de métro dans ces deux étapes. Des résultats d'analyse seront comparés pour identifier l'effet des changements sur le réseau. Ces quatre modifications importantes et représentatives sont : la jonction entre Châtelet et Raspail sur la ligne 4 en 1910, le prolongement de la ligne 7 par intégration d'un tronçon initialement appartenant à la ligne 10 en 1931, le remplacement et le report des sections entre les lignes 8, 10 et 14 en 1937, ainsi que la section de la ligne 5 affectée à la ligne 6 en 1942.

### 1) Cas d'étude 1 (1910) : jonction entre Châtelet et Raspail en ligne 4

La ligne 4 dont le tracé a été modifié à plusieurs reprises, est la première ligne qui traverse la ville perpendiculairement à la Seine, desservant la gare Montparnasse côté rive gauche et Châtelet en centre ville. Le 21 avril 1908, la section nord de la ligne 4 Clignancourt-Chatelet est mise en service, suivie de l'ouverture de la section sud Raspail-Porte d'Orléans le 30 octobre 1909. Enfin, le 9 janvier 1910, les sections nord et sud sont connectées, et la ligne 4 enjambe la Seine.

Nous étudierons l'impact d'une telle jonction, en nous appuyant sur le tableau 8 illustrant le réseau avant (Etape A) et après *connexion* (Etape B).

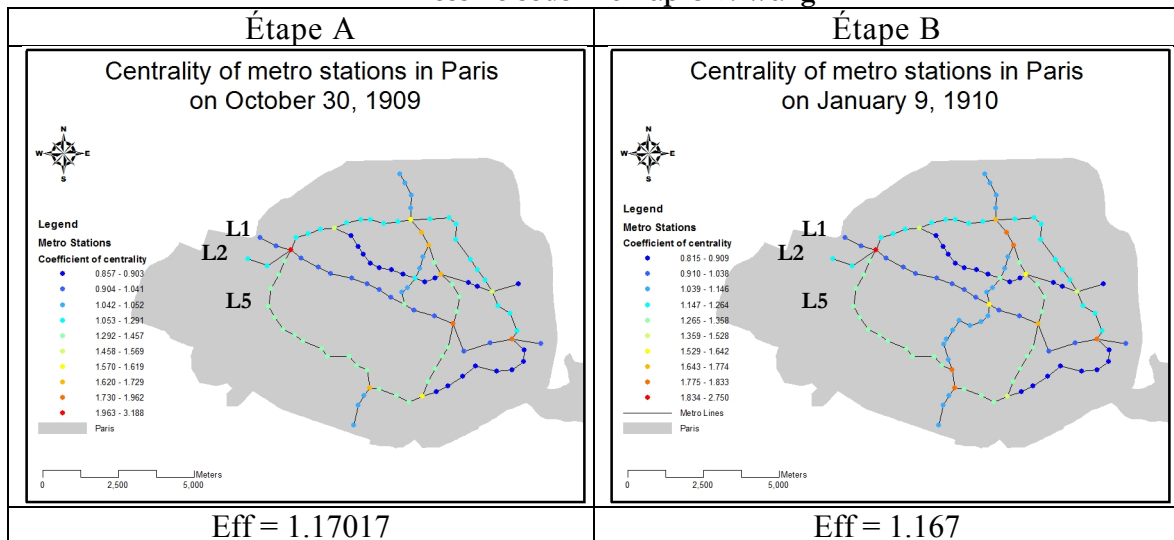
Tableau 8 Cas d'étude 1: l'étape A et B du réseau de métro parisien  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données AMTUIR



Le tableau 9 ci-dessous illustre le coefficient de *centralité* des stations de métro dans les étapes A et B. Les stations en rouge représentent les valeurs de la *centralité* le plus élevée, tandis que celles en bleu ont le coefficient le plus faible.

Dans l'étape A, la station Etoile a le coefficient de *centralité* plus important du réseau. Trois lignes s'y croisent: les lignes 1, 2 5. D'autres intersections sur la ligne 1 sont également importantes dans l'ensemble du réseau. Globalement, les intersections sont plus importantes que des stations simples. Les stations simples présentant la *centralité* la plus importante se trouvent sur la ligne 5, sans doute du fait que cette ligne a au moins une correspondance avec toutes les autres lignes.

Tableau 9 Cas d'étude 1: comparaison de la *centralité* dans l'étape A et B  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang





Dans l'étape B, sauf pour l'intersection Etoile, le coefficient de *centralité* des quatre intersections sur les lignes 4 et 5 augmente significativement. Dont la Gare du Nord et la Gare de l'Est, ce qui laisse à penser qu'après la jonction des sections nord et sud de la ligne 4, ces deux gares sont mieux desservies qu'avant. Cependant, la *centralité* des stations simples reste stationnaire.

Dans ce cas d'étude, la jonction sur la ligne 4 a renforcé la *centralité* des intersections, notamment des nouvelles intersections sur les lignes 4 et 5. Malgré ces augmentations de la *centralité* sur ces intersections, le coefficient d'*efficacité* du réseau baisse de 1.170 à 1.167. Cela indique que l'augmentation du nombre de stations simple pourrait influencer également l'*efficacité* du réseau.

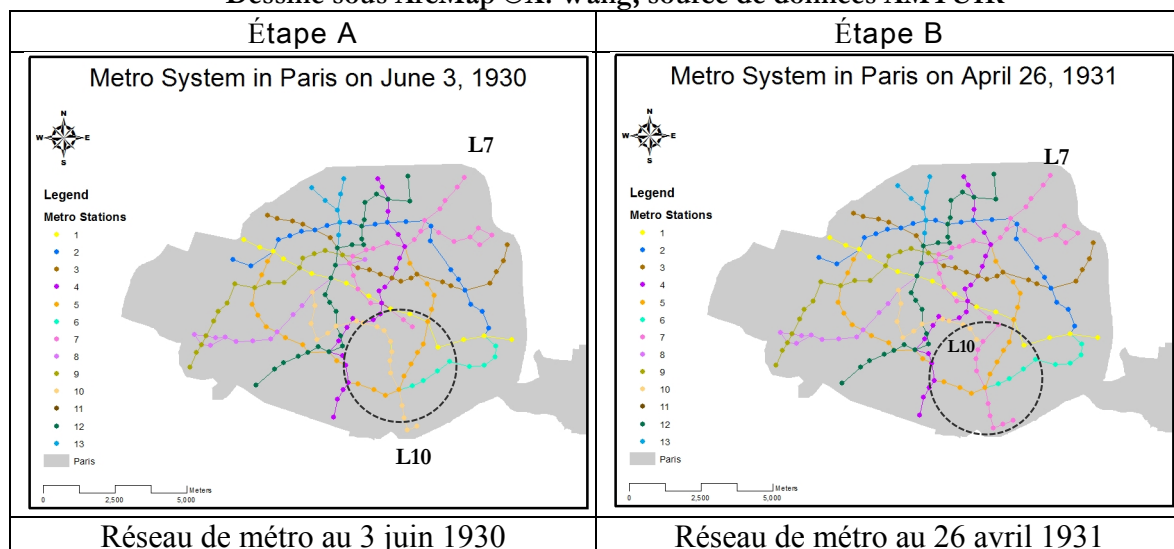
## 2) Cas d'étude 2 (1931) : prolongement de la ligne 7 par intégration d'un tronçon de la ligne 10

Le 7 mars 1930, la ligne 10 est prolongée depuis la station l'Odéon jusqu'à Porte de Choisy, mais le trafic sur cette ligne est relativement faible. Au vu du peu de fréquentation de cette partie du réseau, les ingénieurs intégreront une section de la ligne 10 pour créer une extension de la ligne 7 depuis la station Pont Marie.

En juin 1930, la ligne 7 se voit rajouter une section de la gare Pont Marie jusqu'à la station Sully-Morland. Cette section de la ligne devrait ensuite franchir la Seine vers Jussieu. Cette nouvelle station devrait être la correspondance des lignes 7 et 10. La section Jussieu-Porte de Choisy sur la ligne 10 devrait être reprise par la ligne 7. Le 26 avril 1931, la ligne 7 fut prolongée depuis Sully-Morland à la Porte de Choisy.

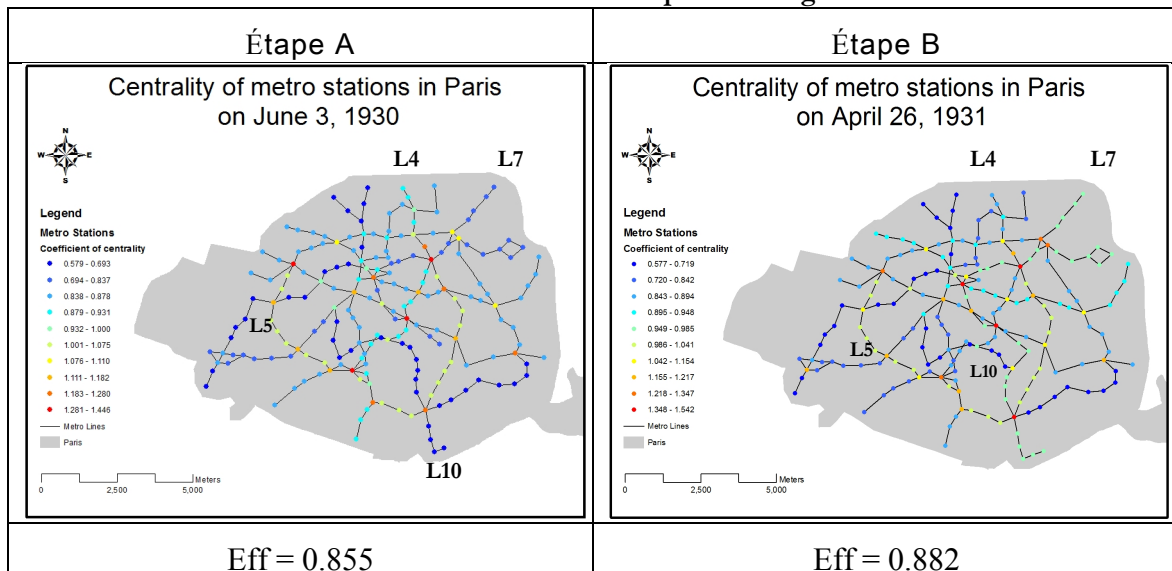
Le tableau 10 illustre ces étapes, l'étape A représentant le réseau de métro au 3 juin 1930 avant la mise en œuvre de l'extension, et l'étape B au 26 avril 1931, après extension.

Tableau 10 Cas d'étude 2: l'étape A et B du réseau de métro  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données AMTUIR



Le tableau 11, dans l'étape A, montre que les stations de métro les plus centrales sont des intersections qui se trouvent principalement sur la ligne 4. En général, le coefficient de *centralité* des intersections est plus élevé que celle des stations simples. La ligne 5 présente une *centralité* relativement importante à l'échelle de l'ensemble du réseau (en vert). Les stations simples sur la ligne 10 ont un coefficient de *centralité* très faible, et celles de la ligne 7 également ont un coefficient modeste.

Tableau 11 Cas d'étude 2: comparaison de la *centralité* dans étape A et B  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang



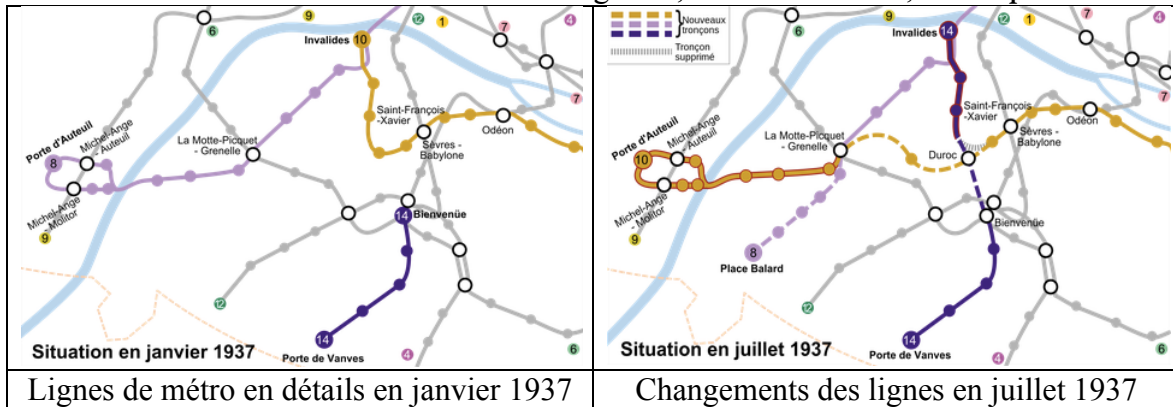
Dans l'étape B, la *centralité* de la ligne 7 est sensiblement améliorée, y compris au niveau des intersections, ainsi que les stations simples, en la faisant une des lignes les plus importantes après la ligne 5. La *centralité* de la ligne 10 reste, quant à elle, toujours faible. Les autres lignes de métro également sont influencées par cette modification : par exemple, la *centralité* des stations simples sur la ligne 4 diminue légèrement, tandis que celle de la ligne 2 augmente un peu.

Dans ce cas d'étude 2, la *centralité* des stations sur plusieurs lignes de métro est améliorée, notamment des stations simples et des intersections sur la ligne 7. Le coefficient d'*efficacité* du réseau augmente de 0.855 à 0.882. Cela indique que ce changement des lignes a bien réduit le nombre de correspondance nécessaire en moyenne nécessaire pour des trajets sur le réseau.

### 3) Cas d'étude 3 (1937) : remplacement et report des sections entre les lignes 8, 10 et 14

Dans les années 1930s, des lignes diamétrales à travers Paris sont progressivement devenues plus importantes au sein du réseau que les lignes circonférentielles. La Ligne 8 perd peu à peu son but principal de connecter le bois de Boulogne et le bois de Vincennes. Dans le même temps, le trafic sur la ligne 10 reste relativement faible. En outre, le projet de la ligne 14 (actuelle ligne 13), ainsi que la jonction entre les stations La Motte-Picquet et Balard sur la ligne 8, restent en suspens. Dans ce contexte, le conseil municipal de Paris décide le 9 décembre 1932 de prolonger et réorganiser ces lignes de métro.

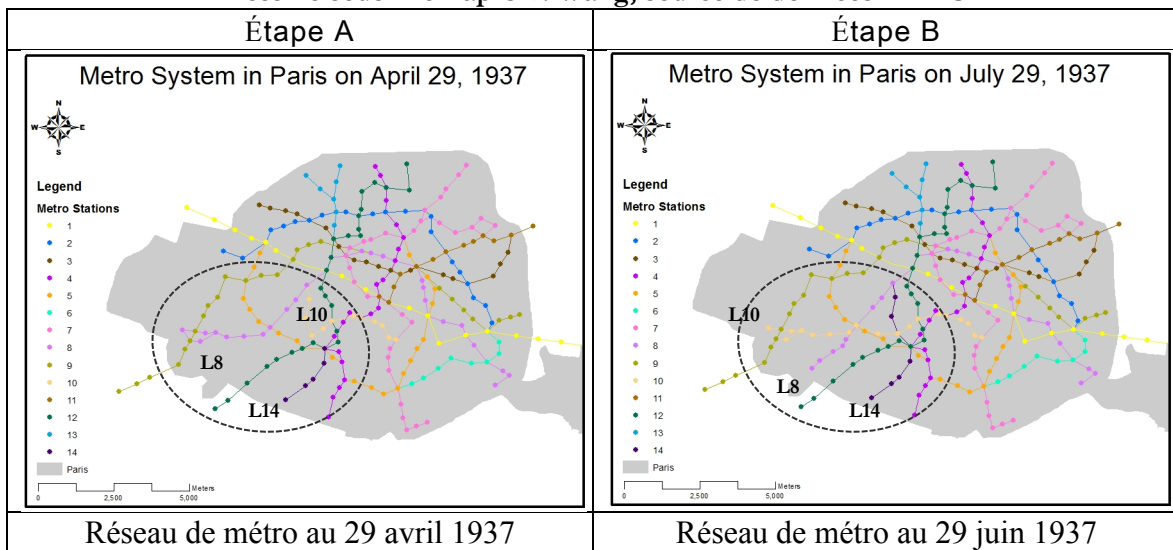
Tableau 12 Modifications sur les lignes 8, 10 et 14 en 1937, © Wikipedia



Suivant ce projet de modification, la station Balard devient le nouveau terminus de la ligne 8. La section La Motte-Picquet - Porte d'Auteuil de la ligne 8 est transférée sur la ligne 10. La section de la ligne 10 entre Duroc et Invalide est intégrée à la ligne 14 (cf. tableau 12). Avant la construction des nouvelles lignes, le projet de restructuration entre la 8, la 10, et la 14 est déjà prévu afin de réduire les inconvénients inhérents aux travaux. Le 29 juillet 1937, la réorganisation de ces trois lignes est achevée.

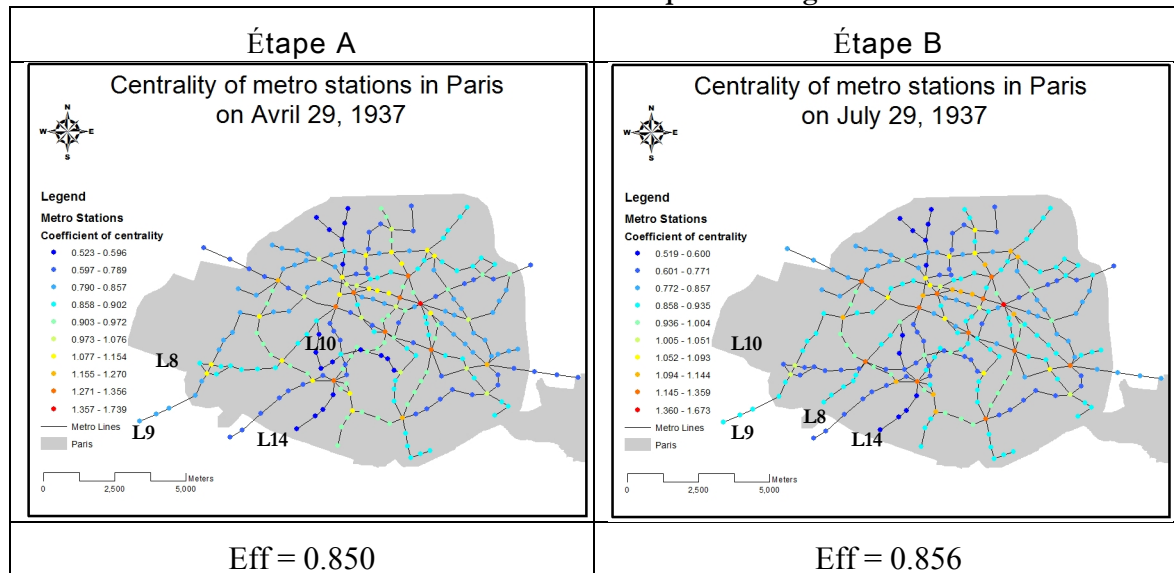
Le tableau 13 illustre ce cas d'étude, l'étape A représentant le réseau de métro au 29 janvier 1937 avant modifications, et l'étape B au 29 juillet 1937 après modifications.

Tableau 13 Cas d'étude 3: l'étape A et B du réseau de métro  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données AMTUIR



Dans l'étape A, la station la plus centrale est l'intersection République. Une dizaine d'intersections figurent en deuxième et troisième catégories de coefficient de *centralité* (en couleur orange foncé et orange clair). Des stations simples les plus centrales se trouvent sur la ligne 4 et la ligne 5. Les lignes 10 et 14 présentent une *centralité* globalement très faible (cf. tableau 14).

Tableau 14 Cas d'étude 3: comparaison de la *centralité* dans l'étape A et B  
Dessiné sous ArcMap ©X. Wang



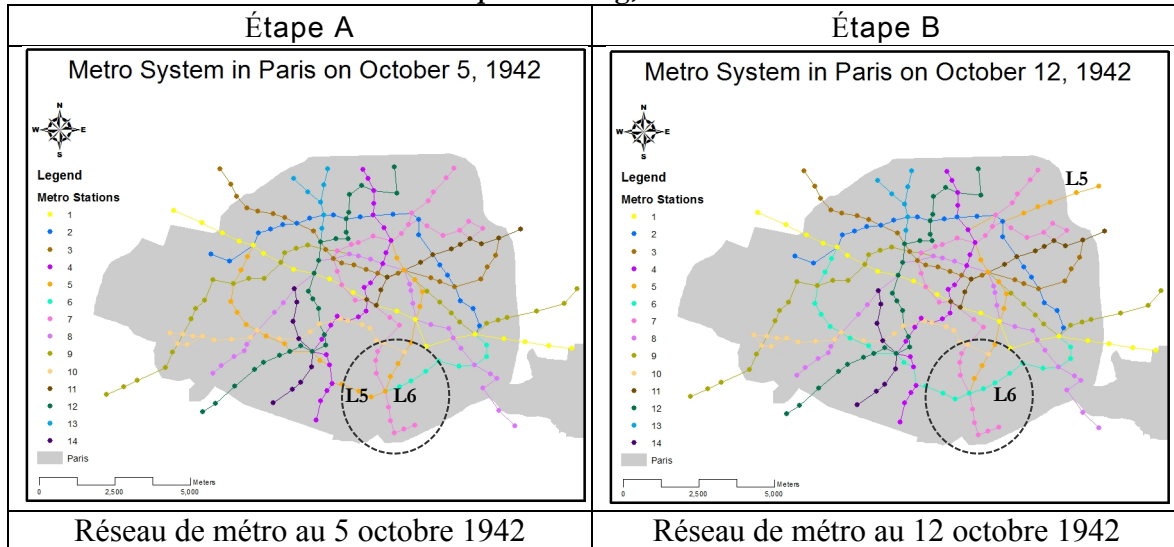
Dans l'étape B, la station République est toujours la plus importante du réseau. On voit par contre que le nombre des stations de deuxième et troisième catégorie en terme de *centralité* a doublé. Les coefficients des lignes 10 et 14 restent faibles, quoique ceux de la ligne 10 ont légèrement augmenté. La *centralité* de la ligne 9 est bien plus importante qu'avant modifications. La *centralité* des stations de la ligne 8, par contre, ne connaît pas de changements significatifs par rapport à l'étape A. D'autres lignes sont également affectées par la restructuration des lignes 8, 10 et 14 : par exemple, des stations simples sur la ligne 4 sont devenues moins importantes que dans l'étape A (cf. tableau 14).

Au vu de cette analyse, on constate que ces changements ont effectivement augmenté la *centralité* de plusieurs intersections, notamment aux croisements des lignes 5, 8 et 9. Cette restructuration permet d'offrir un service plus équilibré au niveau des lignes 8, 10 et 14. Par exemple, la ligne 10 répond mieux à la demande de trafic entre la banlieue et le centre-ville. Néanmoins, l'*efficacité* du réseau n'est globalement pas beaucoup améliorée, malgré la modification de ces lignes. L'*efficacité* du réseau dans l'étape B (Eff= 0.856) a légèrement augmenté par rapport à celle dans l'étape A (Eff= 0.850).

#### 4) Cas d'étude 4 (1942) : une section de la ligne 5 est affectée à ligne 6

Selon un projet de 1901, la ligne 5 (ancienne section sud de la ligne 2) est reliée avec la section Place d'Italie-Nation de la ligne 6 formant une ligne circonférentielle au sud de Paris. Toutefois, la ligne 6 traversant à l'époque une zone peu développée, avec un trafic limité, ce projet est reporté. La ligne 5 est restée l'une des plus longues lignes dans le réseau de métro pendant 30 ans.

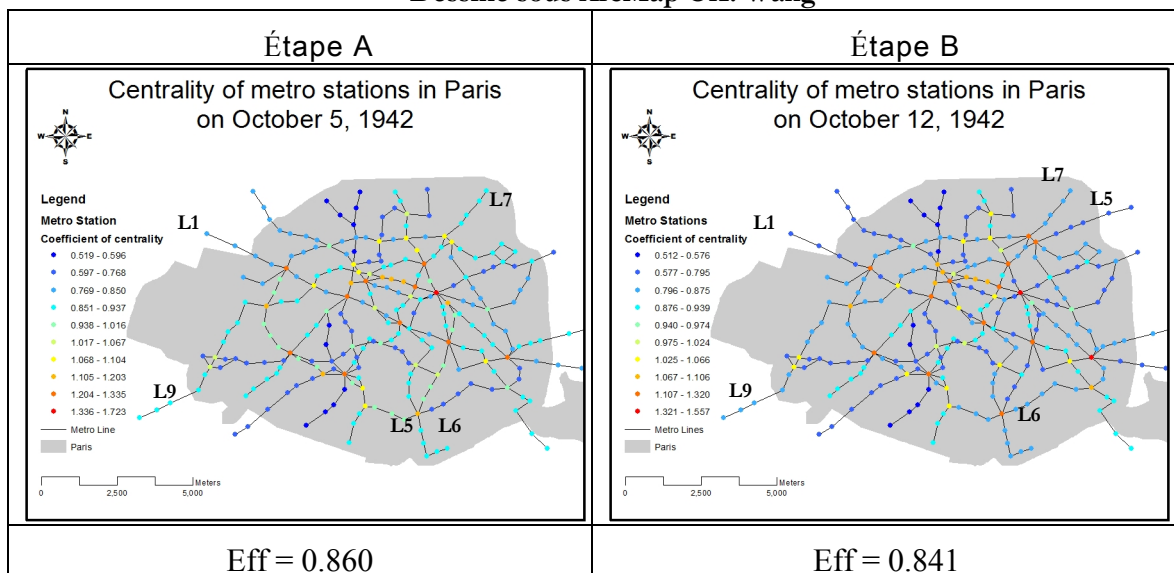
Tableau 15 Cas d'étude 4: l'étape A et B du réseau de métro  
 Dessiné sous ArcMap ©X. Wang, source de données AMTUIR



En 1942, afin de répondre à la demande croissante de transports en commun, la ville de Paris met en œuvre l'extension de plusieurs lignes du métro, y compris la ligne 5 à la station Eglise de Pantin. Cette extension de la ligne 5 a induit des remaniements avec la ligne 6. Tout d'abord, la ligne 5 est coupée à la station Place de d'Italie, et la section entre les stations Etoile et Place d'Italie est intégrée à la ligne 6. Finalement, la ligne 6 devient une ligne circumférentielle dans le sud de Paris, et la ligne 5 est désormais une ligne tangentielle perpendiculaire à la seine.

Dans ce cas d'étude, l'étape A représente le réseau de métro au 5 octobre 1942 avant modification, et l'étape phase B au 12 octobre 1942 après changement (cf. tableau 15).

Tableau 16 Cas d'étude 4: comparaison de la centralité dans l'étape A et B  
 Dessiné sous ArcMap ©X. Wang



Le tableau 16 montre que, dans l'étape A, les stations simples les plus importantes se trouvent sur la ligne 5. Cette ligne est la plus longue dans l'ensemble du réseau, et a également des correspondances avec beaucoup de lignes. Les stations les moins

centrales sont les stations simples des lignes 13 et 14. La *centralité* de la ligne 6 est également faible.

Dans l'étape B, après ces remaniements, le nombre de stations les plus centrales (dans les trois premières catégories) n'a pas considérablement augmenté. La *centralité* sur la ligne 5 est descendue de deux rangs dans le classement, alors que la *centralité* de la ligne 6 est montée d'une catégorie. Après modification, ces deux lignes se trouvent dans la même catégorie de *centralité*. Comme sur la ligne 5, on observe une baisse de la *centralité* sur d'autres lignes également, par exemple la 1, la 9 et la 7.

Dans ce cas d'étude, l'ancienne ligne 5 diamétrale en forme "L" est coupée en deux parties, dont l'une est intégrée à la ligne 6. Ce changement de ligne a effectivement amélioré la *centralité* de la ligne 6, mais il y a eu la baisse de la *centralité* sur plusieurs des autres lignes de métro. Le coefficient d'*efficacité* a diminué de 0.860 à 0.841. Cela montre que ces changements ont un impact négatif sur la *centralité* de l'ensemble du réseau.

## VII. Analyse sur le réseau actuel de métro parisien

### 1. Analyse sur des caractéristiques du réseau de métro parisien

#### 1) Répartition des stations de métro parisien

Le réseau actuel du métro parisien, dont le projet visait à répondre aux besoins du trafic dans Paris intra-muros, est réputé être un des plus denses du monde, avec 245 stations de métro réparties sur une surface de 86,9 km<sup>2</sup>. La distance moyenne entre les stations est 548 m, variant entre 424 m en moyenne sur la ligne 4 et 1 km en moyenne sur la ligne 14. La distance moyenne entre deux stations extra-muros est relativement plus grande que celle à l'intérieur de la ville (cf. figure 7). Du fait que la répartition des stations est dense, la vitesse de métro est limitée à seulement 20 km/h (sauf sur la ligne 14). Pourtant la durée du trajet entre deux stations est seulement de 1,3 min à 1,5 min.

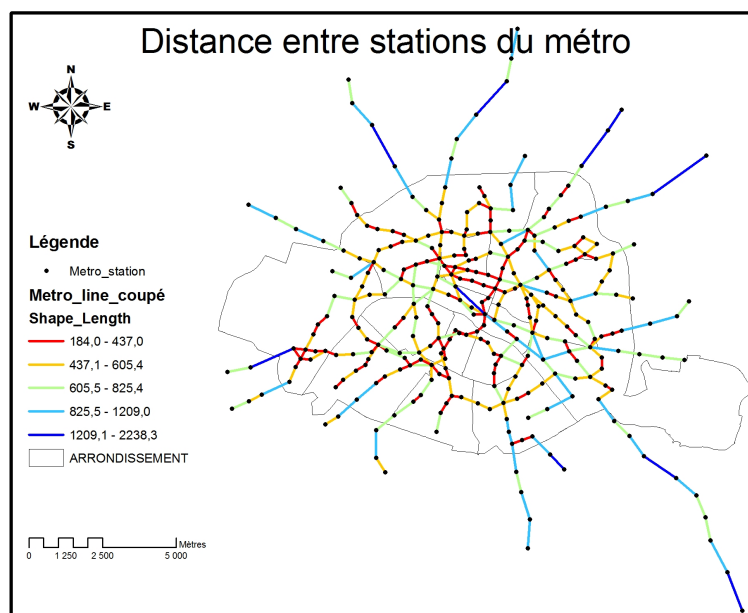
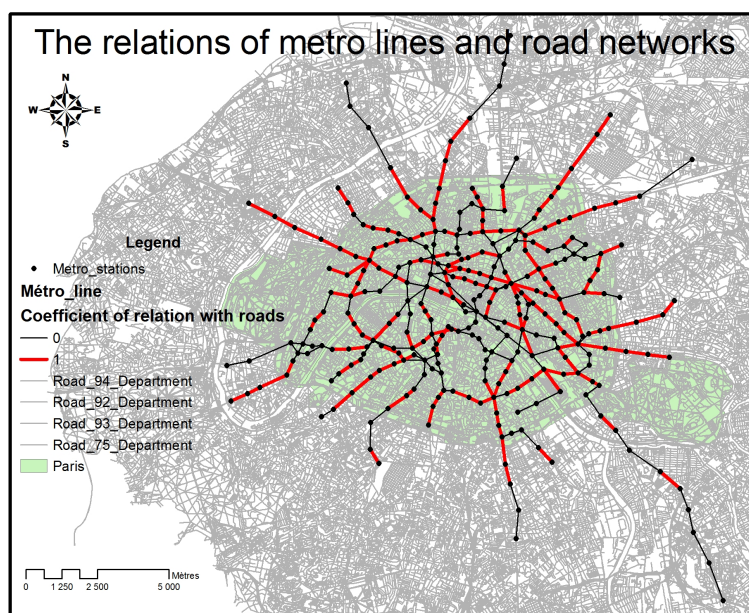


Figure 7 Distance entre stations de métro parisien



## 2) Superposition entre le réseau de métro et le réseau routier à Paris



**Figure 8 Rapport entre réseaux de métro et réseaux routiers**

La plupart du réseau de métro parisien est souterrain. Au début de la construction, la méthode du génie civil souvent utilisée est celle de la tranchée couverte. Cette technique de construction présente peu de contraintes techniques, et c'est pourquoi les premières lignes de métro ont été construites sous des avenues et boulevards, comme les lignes 1, 2 et 6, ainsi que certaines extensions des lignes de métro. La figure 8 illustre la superposition du réseau de métro et du réseau routier. Les segments de lignes en rouge indiquent les parties des deux réseaux qui sont en parallèle. Au total, plus de 110 km de ligne de métro, soit environ 50% du réseau, est en superposition avec le réseau routier.

## 3) Caractéristiques des lignes du métro

V.R. Vuchic (2005) a défini sept types de lignes de métro selon leur formes et leur emplacements dans la ville : radiale, diamétrale, tangentielle, circonférentielle, en boucle, ligne branche, et ligne bis. Chaque type de ligne présente des caractéristiques différentes ainsi que des fonctions variées. Les plus représentées sont des lignes diamétrales (cf. tableau 15).

**Tableau 15 Différents types de ligne de métro parisien**

Type de ligne	Ligne radiale	Ligne diamétrale	Ligne tangentielle	Ligne circonférentielle	Ligne boucle	Ligne branche	Ligne Bis
Ligne de métro	Ligne 11	Ligne 1, 3, 4, 7, 8, 9, 12 et 14	Ligne 5, 10, 13	Ligne 2 et 6	Ligne 7b et 10	Ligne 7 et 13	Ligne 3, 3b, 7 et 7b
Nombre de ligne	1	8	2	2	2	1	2

Parmi ces lignes diamétrales, certaines sont en direction nord-sud (lignes 4, 7 et 12), nord-est-nord-ouest (lignes 1 et 3), sud-est-sud-ouest (lignes 8 et 9) et en direction nord-ouest-sud-est (ligne 14). Les lignes diamétrales à Paris visent à desservir les directions "le long de la Seine" ou "perpendiculaire à la Seine" (cf. figure 9). En général, les lignes diamétrales traversent le centre ville, avec des terminus situés de part et d'autre de la périphérie. En forme de U ou de L, ces lignes peuvent desservir une zone urbaine assez large et assurer une répartition équilibrée du trafic dans la ville. Ces huit lignes diamétrales sont les couloirs dominants du trafic, et constituent la structure principale du réseau de métro parisien.

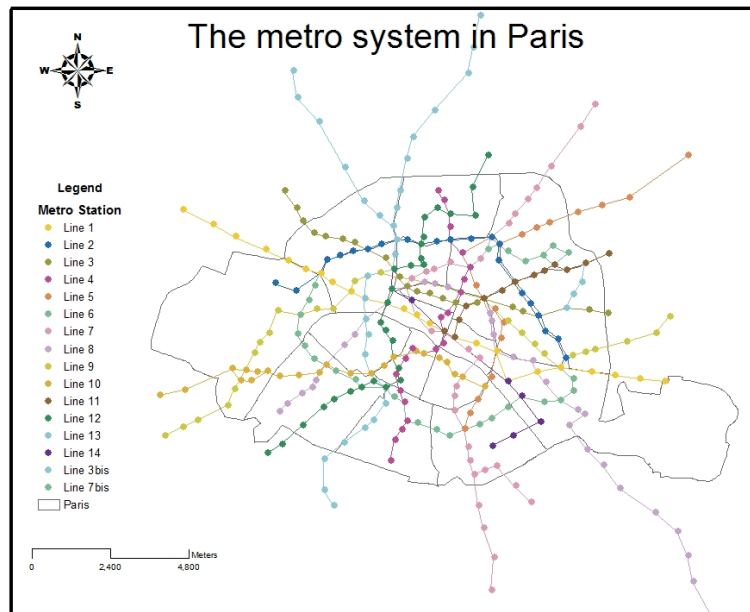


Figure 9 Réseau du métro parisien

Les lignes circonférentielles, comme les lignes 2 et 6, représentent un autre type de ligne important dans le réseau du métro parisien. Ce type de ligne vise à distribuer le flux du trafic vers les quartiers périurbains. Elles peuvent desservir la périphérie en évitant la congestion du centre-ville. Elles croisent souvent d'autres lignes, elles jouent un rôle aussi important par leurs correspondances. Tout comme Paris, d'autres villes également adoptent une ligne circonférentielle entière plutôt que deux lignes en demi-cercles, par exemple Beijing, Moscou et Séoul.

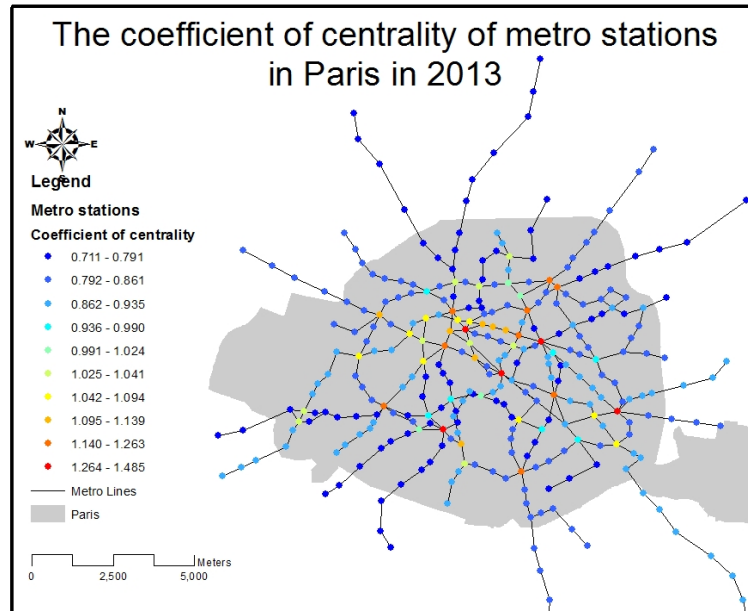
La ligne 11 est une ligne radiale. Un de ses terminus est situé au centre ville à Châtelet, tandis que l'autre est au nord-est de Paris. Son rôle est de desservir le flux des voyageurs allant du centre-ville vers la banlieue. L'inconvénient est que son service s'arrête au centre-ville : les voyageurs sont obligés de changer de ligne pour poursuivre leur trajet. En outre, le coût de la construction du terminus au centre ville est souvent plus élevé.

Les lignes 5, 10 et 13 sont des lignes tangentielles. Elles ne passent pas par le centre-ville, et leur fonction est de compenser les lacunes du service des autres lignes. D'ailleurs, la ligne 10 a adopté également une section de la ligne en boucle. Des lignes en boucles ont souvent une partie de la ligne en sens unique. Dans le réseau de métro parisien, la ligne 7bis a également adopté une section de la ligne boucle. Le trafic entrant sur ces deux sections des lignes est relativement faible à cause du circuit en sens unique, ainsi que l'emplacement des stations.



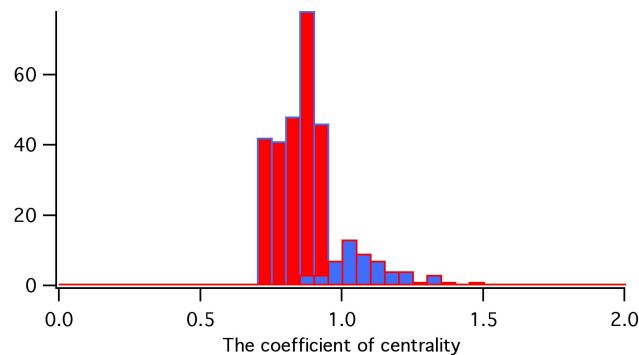
Les lignes 7 et 13 ont adopté une forme en branche afin de distribuer le flux du trafic plus largement vers la banlieue. Les lignes bis, 3bis et 7bis, visent à connecter des lignes avec une petite jonction. Par exemple la ligne 7bis connecte entre elles les lignes 2, 5, 7 et 11. Mais le flux du trafic sur ces deux lignes est le plus faible de l'ensemble du réseau.

## 2. Analyse de *centralité* sur le réseau de métro



**Figure 15** Le coefficient de *centralité* des stations du métro en 2013  
(Dessiné en ArcMap ©Xi Wang, source de données OpenData RATP)

La figure 15 présente la *centralité* du métro parisien en 2013. Les stations simples, situées sur une même ligne unique, ont des coefficients de *centralité* identiques. Les correspondances, quand à elles, ont des coefficients différents et, en général, plus importantes sur l'ensemble du réseau (cf. la figure 16). A partir d'une correspondance, les voyageurs pourraient atteindre toutes les stations sur deux ou plusieurs lignes de métro. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces dernières accumulent la *centralité* des lignes auxquelles elles appartiennent. Il est implicite qu'il existe une corrélation positive entre la *centralité* et la *connexion* des lignes de métro.

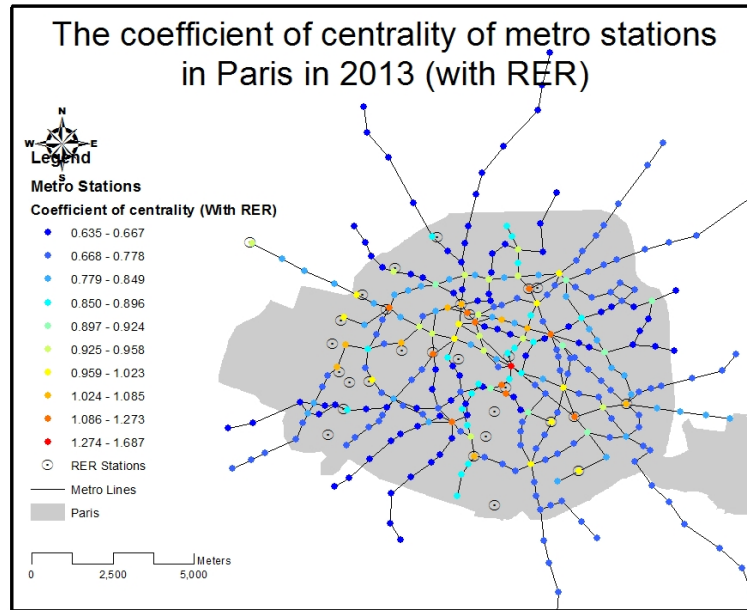


**Figure 16** *Centralité* des stations de métro parisien dessiné sous Igor Pro ©Xi Wang (Les correspondances sont représentées en bleues)

Les stations les plus centrales sont: République, Châtelet, Opéra, Nation et Montparnasse-Bienvenue. Elles sont toutes des intersections importantes. La station République, par exemple, est une correspondance avec cinq lignes de métro,

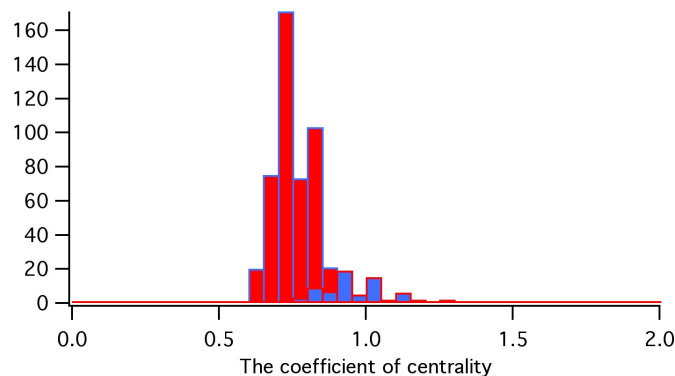
les lignes 3, 5, 8, 9 et 11. Les stations moins centrales sont des stations simples se situant sur la ligne 11. Cette ligne est une ligne radiale avec un des terminus Châtelet au centre ville et l'autre terminus au nord-est de Paris. Comme cette ligne est courte, elle n'a pas été reliée avec d'autres lignes de métro. L'indicateur d'efficacité du métro parisien a été évalué à 0.860183.

Dans l'analyse précédente, nous avons simplifié et considéré uniquement les stations de métro. En réalité, les voyageurs peuvent également emprunter le RER. Dans cette analyse, nous prendrons en compte les correspondances entre des stations de métro et les ligne A, B, C, D, E du RER.



**Figure 17 Centralité des stations du métro et du RER dessiné sous ArcMap ©Xi Wang, source de données : RATP OpenData**

La figure 17 montre le coefficient de *centralité* des stations de métro parisien quand on prend en considération des intersections de métro et RER. Les stations les plus centrales sont Châtelet, Opéra et Montparnasse-Bienvenue, et deux nouvelles stations : Gare du Nord et Saint-Michel, qui n'étaient pas dans liste précédente. Dans cette analyse, leurs coefficients de *centralité* ont même augmenté sous l'influence du RER. Des stations simples sur la ligne 4 sont également devenues plus centrales. Les stations les moins centrales sont les stations simples sur la ligne 12. Nous pouvons observer que le RER a ajouté du poids à certaines stations de métro.



**Figure 18 Centralité des stations de métro parisien (avec RER) dessiné sous Igor Pro ©Xi Wang (Les correspondances sont représentées en bleu)**

La figure 18 montre que les intersections ont toujours des coefficients de *centralité* plus importants par rapport aux stations du réseau. Mais que sous l'influence du RER, elles ont changé.

L'indicateur d'*efficacité* du métro parisien est 0.771204. Même si dans cette analyse, le nombre d'intersections a augmenté, nous pouvons remarquer qu'elle a diminué par rapport à l'analyse précédente. Cela montre que l'*efficacité* ne dépend pas seulement du nombre d'intersection, mais aussi du nombre de stations.

### 3. Comparaison entre le coefficient de *centralité* et la densité du trafic entrant des stations du métro

Le tableau 18 présente la répartition de stations en trafic entrant en 2011 en fonction du type de station sur des échantillons de 50 et 100 stations. D'après ce tableau, nous pouvons constater que la majorité des stations à fort trafic entrant sont des intersections. La proportion des stations simples y est relativement faible.

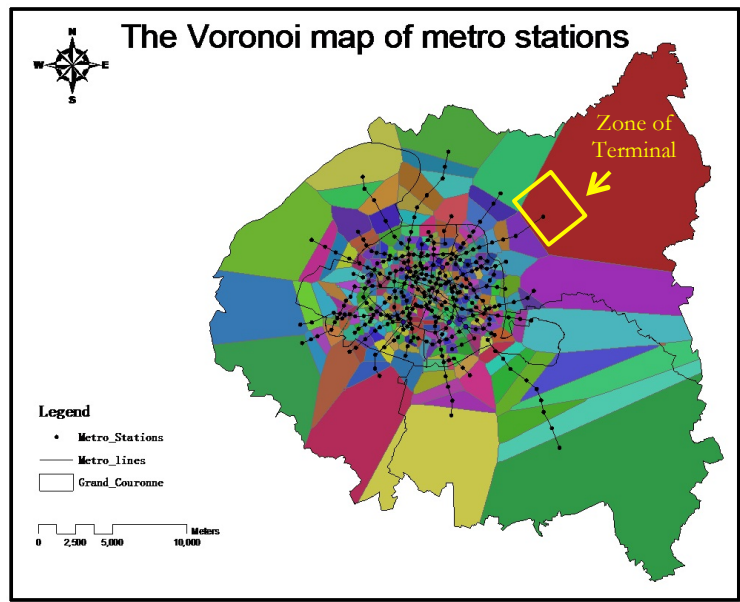
**Tableau 18 Les types de stations du métro parisien**  
En tête du trafic entrant en 2011, Source de donnée : © RATP Open Data

Rang des stations en trafic entrant 2011	Type des station			
	Intersection	Terminus	Stations simple	
			Paris	Banlieue
Top 50	36 (72%)	6 (12%)	4 (8%)	4 (8%)
Top 100	53 (53%)	13 (13%)	23 (23%)	11 (11%)

Le terminus de certaines lignes a aussi un trafic entrant plus élevé, car le terminus a souvent une aire de service plus large grâce aux connections avec des transports en commun de banlieue/périurbain.

Le trafic entrant pourrait montrer l'importance relative d'une station dans l'ensemble du réseau. Il est par conséquent intéressant de comparer le trafic entrant avec le coefficient de *centralité* Structuralité des stations. Parce que le coefficient de *centralité* pourrait évaluer l'importance d'un nœud dans un réseau. Dans les sections suivantes, nous allons comparer ces deux indicateurs.

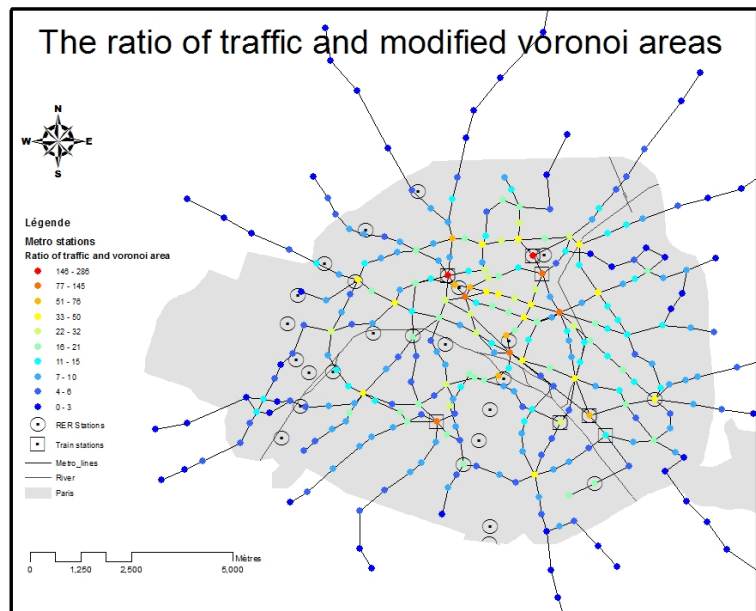
Afin de réduire l'effet de différentes aires de service des stations, la densité du trafic, soit le ratio du trafic entrant est calculé avec des surfaces Voronoï des stations. Un diagramme de Voronoï est un découpage du plan (pavage) à partir d'un ensemble de points appelés « germes », chaque cellule enfermant un seul germe, tel que la cellule est l'ensemble des points du plan plus proches d'un germe que de tous les autres. La cellule représente en quelque sorte la « zone d'influence » du germe.



**Figure 19 Diagramme de Voronoi des stations de métro parisien dessiné sous ArcMap ©Xi Wang, source de données RATP OpenData**

Comme cette méthode adopte le principe de plus proche pour diviser l'espace, nous pouvons l'utiliser pour simuler l'aire de service des stations de métro. Parce que quand les voyageurs prennent le métro, ils choisissent généralement les stations les plus proches de leurs points de départ. Par contre, nous pouvons observer dans la figure 19 que des zones Voronoï de terminus de certaines lignes en banlieue ne sont pas bien définies. Afin de le corriger, ces zones de Voronoï sont recalculées différemment selon leur distance avec des terminus voisins (cf. figure 19).

1) Analyse comparative sur l'ensemble du réseau



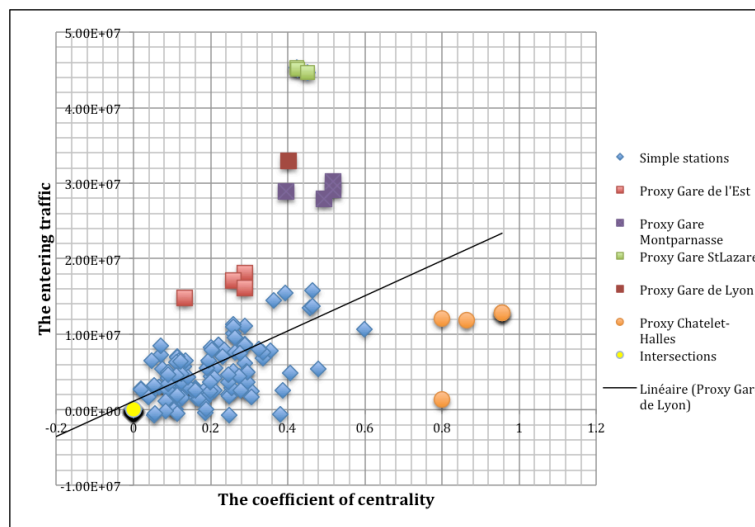
**Figure 20 La densité du trafic entrant des stations de métro parisien Dessiné sous ArcMap ©Xi Wang, source de données RATP Open Data**

La figure 20 présente la densité du trafic entrant des stations de métro parisien. Les cinq stations les plus importante dans ce réseau sont alors Saint-Lazare, Gare du Nord,

Montparnasse-Bienvenue, Châtelet et République. Parmi ces stations, il y a trois intersections de gares parisiennes, où une masse de voyageurs arrive depuis l'extérieur de Paris. Deux autres stations sont des intersections importantes dans le réseau de métro. Par exemple, la station Châtelet est la correspondance de cinq lignes de métro. Elle est également accessible à la station de RER Châtelet-les Halles, qui est l'intersection de trois lignes de RER.

Nous pouvons observer que la densité du trafic entrant des intersections est bien plus significative que celle des stations simples. La densité du trafic des stations simples descend progressivement depuis le centre ville vers des banlieues parisiennes (cf. figure 20). Quand on compare la *centralité* des stations dans la figure 17, on constate que le coefficient de *centralité* des stations a une bonne cohérence avec la densité du trafic entrant. La *centralité* a donc bien indiqué la spécificité des certaines stations importantes.

En plus, nous pourrions observer un « effet de pompage » des intersections sur les stations simples alentour. Pour analyser cet effet, nous avons calculé la différence entre la densité du trafic entrant et le coefficient de *centralité* des intersections ainsi que des stations simples autour. La figure 21 présente le résultat des calculs. Des points jaunes superposés (0, 0) représentant des intersections. Des losanges bleu clair montrent des stations simples autour des intersections. D'autres groupes de points indiquent des stations simples autour des gares ou la station RER Chatelet-les-Halles.



**Figure 21 La différence des valeurs de *centralité* et de la densité du trafic entrant des intersections et les stations simples alentour**

Nous pouvons observer un effet de pompage: le coefficient de *centralité* ainsi que la densité du trafic entrant diminuent autour des intersections. De plus, des stations simples autour des quatre gares (Gare de l'Est, Gare Montparnasse, Gare St-Lazare et Gare de Lyon) ont le trafic entrant relativement plus importants que leur coefficient de *centralité*. Cela montre que le flux du trafic depuis des gares a également influencé fortement le trafic entrant des stations simples alentour. Par contre, des points ronds orange en présentent des stations simples autour de Châtelet-les-Halles monte que leur coefficient de *centralité* est plus important que leur trafic entrant. Cela indique que l'influence du RER sur des stations simples est moins forte que celle des gares.

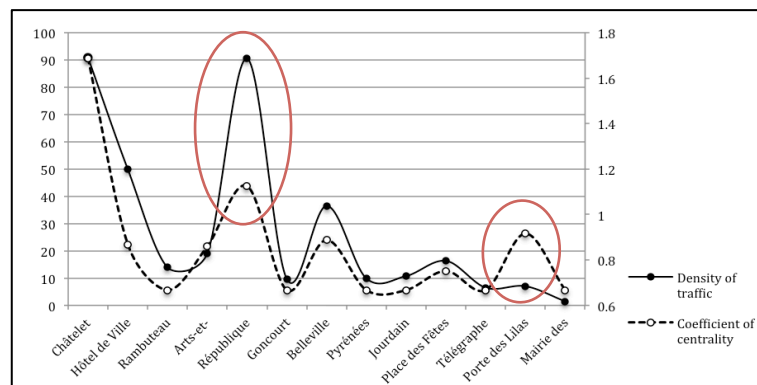
Dans la partie suivante, nous allons comparer ces indicateurs sur différents types de lignes de métro. Cela nous permettra d'observer plus clairement cet effet de pompage, ainsi que des caractéristiques des diverses lignes de métro en termes de trafic entrant.

## 2) Analyse comparative sur certaines lignes du métro parisien

Nous avons choisi sept types de lignes de métro parisien, notamment la ligne radiale, la ligne diamétrale, la ligne tangentielle et la ligne circonférentielle. La répartition du trafic entrant sur ces lignes de métro est bien variée. Le coefficient de *centralité* et la densité du trafic des stations sur ces lignes sont comparés.

- Ligne radiale: ligne 11 (7 intersections)

La ligne 11 est un exemple de ligne radiale qui connecte le centre ville à la station Châtelet et à la banlieue au nord-est de Paris. La figure 22 présente des courbes du coefficient de *centralité* et de la densité du trafic entrant. Il monte qu'il existe une bonne corrélation entre ces courbes d'indicateurs. Le coefficient de *centralité* indique bien des stations importantes sur la ligne, tel que Châtelet, République et Belleville.



**Figure 22** Courbes du coefficient de *centralité* et de densité du trafic entrant en ligne 11

La différence principale entre ces deux courbes est que la *centralité* de la station Châtelet est plus importante que la station République mais leur densité de trafic est équivalente. C'est que dans l'analyse de *centralité*, nous avons pris en considération la correspondance avec des stations RER. Pour la station Châtelet, outre quatre lignes de métro, il y a aussi les RER A, B et D. L'influence de la *connexion* avec des stations RER a augmenté le coefficient de *centralité* pour station Châtelet. Par ailleurs, la *centralité* de la station Porte de Lilas est plus importante que son trafic entrant. Parce que pour simplifier l'analyse, nous avons fusionné la ligne 3 et ligne 3bis. Mais finalement la *centralité*, ainsi que la densité de trafic de la ligne 3bis n'est pas aussi importante que celle de la ligne 3.

- Ligne diamétrale: ligne 8 (13 connexions)

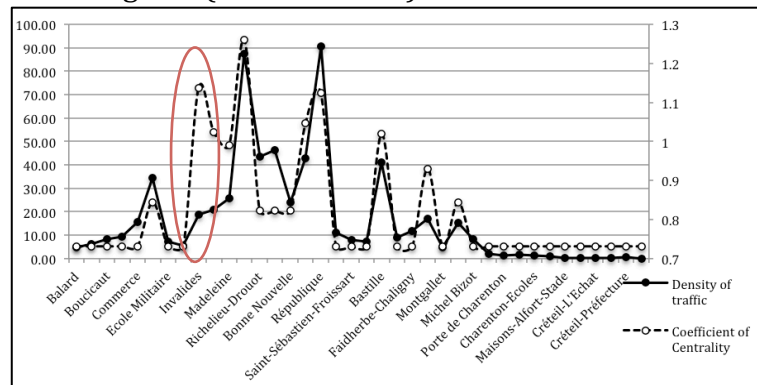


Figure 23 Courbes du coefficient de *centralité* et de densité du trafic en ligne 8

La ligne 8 est un exemple de ligne diamétrale. Ce qui est différent de la ligne 11, c'est que des terminus de cette ligne sont en banlieue en traversant la ville. La figure 23 présente des valeurs des deux indicateurs pour des stations sur la ligne 8. La densité de trafic sur des lignes diamétrales est normalement plus importante au milieu de la ligne qui se situe au centre ville et descend graduellement vers les terminus. Ce type de ligne vise à servir le trafic entre des banlieues et le centre ville.

Nous pouvons observer que les valeurs de ces deux indicateurs correspondent bien aux intersections importantes comme la station Opéra, République et Bastille. Par contre, même si la *centralité* de la station Invalides est importante, sa densité de trafic est relativement faible. Cette station est la correspondance de la ligne 13 et RER C, c'est pourquoi elle est considérée plus centrale dans le calcul. Mais en réalité l'influence du RER sur le trafic à cette station n'est pas très importante.

- Ligne tangential: ligne 5 (9 connexions)

La ligne 5 est un exemple de ligne radiale. Ce type de ligne traverse la ville comme des lignes diamétrale mais sans passer au centre ville. Dans le cas de la ligne 5 du métro parisien, elle se prolonge en banlieue nord-est de paris, et son terminus au sud se connecte aux lignes 6 et 7 à la station Place d'Italie.

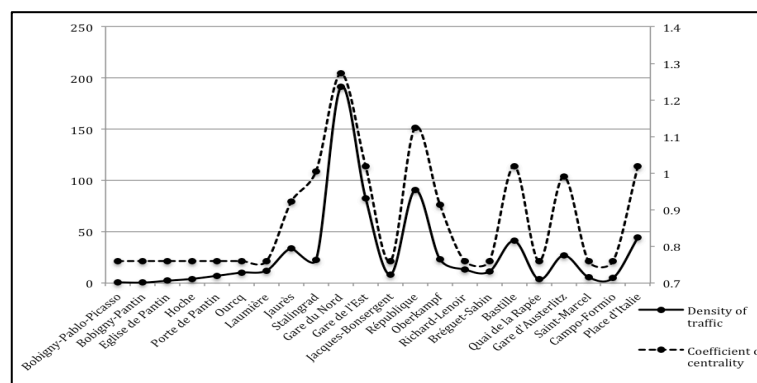


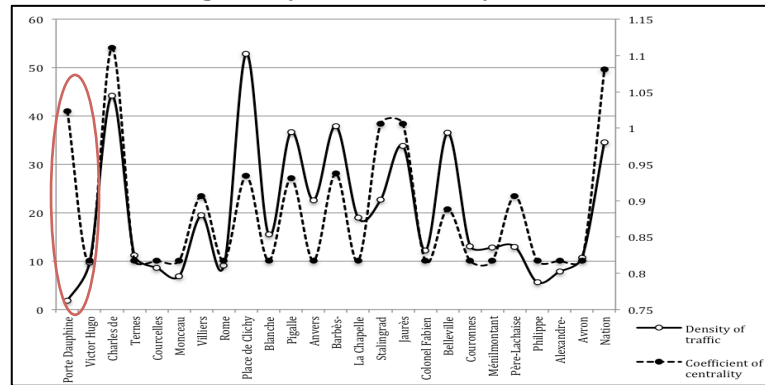
Figure 24 Courbes du coefficient de *centralité* et de la densité du trafic en ligne 5

La figure 24 nous montre les courbes du coefficient de *centralité* et de la densité du trafic en ligne 5. Nous pouvons observer qu'il existe une bonne corrélation entre ces deux indicateurs. Il y a trois gares sur cette ligne, Gare du Nord, Gare de l'Est et Gare d'Austerlitz. Parmi ces trois gares, la *centralité* de la Gare du Nord correspond le



mieux avec la densité du trafic. C'est parce que nous avons considéré des correspondances avec les RER B et D à la Gare du Nord. Cela a mis en avance l'importance de cette station. Nous pouvons observer ainsi clairement l'effet de pompage sur cette ligne : le trafic et la *centralité* descendent parallèlement autour des intersections importantes.

- Ligne circconférentielle: ligne 2 (11 connexions)



**Figure 25** Courbes du coefficient de *centralité* et de la densité du trafic en ligne 2

Comme exemple de la ligne circconférentielle, la ligne 2 joue un rôle important dans le réseau de métro parisien. Sa fonction est de distribuer le trafic sur des lignes radiales et diamétrales vers la périphérie de la ville. En général, des lignes circconférentielle ont des bonnes connections avec d'autres lignes. La figure 25 présente une distribution de la densité de trafic plus équilibrée sur la ligne 2 par rapport aux autres types de ligne. Les deux indicateurs ont également une bonne corrélation.

Par ailleurs, un contraste majeur entre ces deux indicateurs se trouve au terminus Porte Dauphine. Cette station présente un coefficient de *centralité* assez élevé mais avec une densité de trafic relativement faible. Dans l'analyse de *centralité*, cette station est considérée comme une correspondance avec la station de RER Avenue Foch. Cependant, nous pouvons constater plus précisément que la *connexion* entre ces deux stations n'est pas tout à fait accessible pour les voyageurs. C'est pourquoi cette *connexion* avec le RER C n'a pas vraiment d'influence sur le trafic de la station Porte Dauphine sur la ligne 2.

#### 4. Modèles du réseau de métro

Dans cette section, nous allons comparer quatre modèles simples de métro et deux modèles de métro parisien en appliquant l'analyse de *centralité*. En comparant ces modèles de métro, nous pouvons observer certains principes sur des réseaux de métro avec le moins d'éléments possible. De plus, cela pourrait aider à dessiner de nouveaux réseaux de métro et prévoir des points importants dans un réseau.



1) Modèles simples du réseau de métro

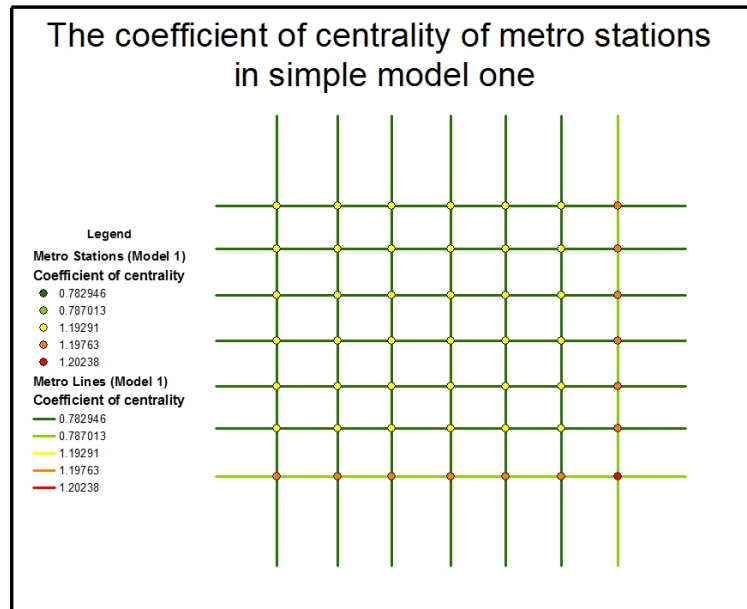
Tableau 17 Quatre modèles simples du métro

Model des réseaux du métro	Connexion des lignes	Paramètres	Descriptions
	- Tout les 14 lignes ont 7 <i>connexions</i>	- 14 lignes au total ; - 303 stations au total ; - <b>49</b> intersections	- 2 lignes diamétrales - 12 lignes tangentielles
	- 2 lignes ont 13 <i>connexions</i> - 12 lignes ont 8 <i>connexions</i>	- 14 lignes au total ; - 303 stations au total ; - <b>37</b> intersections	- 2 lignes diamétrales diagonales - 12 lignes tangentielles
	- 2 lignes ont 12 <i>connexions</i> - 12 lignes ont 8 <i>connexions</i>	- 14 lignes au total ; - 303 stations au total ; - <b>84</b> intersections	- 2 lignes diamétrales - 2 lignes circonférentielles - 10 lignes tangentielles
	- 6 lignes ont 8 <i>connexions</i> - 5 lignes ont 9 <i>connexions</i> - 2 lignes ont 13 <i>connexions</i>	- 14 lignes au total ; - 303 stations au total ; - <b>61</b> intersections	- 1 ligne circonférentielle - 3 lignes diamétrales diagonales - 10 lignes tangentielles

Le tableau 19 présente quatre modèles simples de métro. Tous les modèles ont 14 lignes et 303 stations au total, mais ils ont un nombre de *connexions* qui diffère. Le modèle 1 est un réseau composé de lignes diamétrales et tangentielles. Ces lignes se croisent perpendiculairement en formant une grille. Le nombre de connections sur toutes les lignes est identique (7 connections). Le modèle 2 est un réseau en grille en y ajoutant deux lignes diagonales. Le nombre des connections entre les lignes est supérieur par rapport au modèle 1, mais le nombre d'intersections est plus faible. Le modèle 3 est également un réseau basé sur une grille, mais au lieu d'ajouter des lignes diagonales, deux lignes circonférentielles à la périphérie du réseau sont ajoutées. Ce dernier a le plus d'intersections parmi les quatre modèles. Le dernier modèle de métro est une combinaison du modèle 2 et du modèle 3 ; il a différents types de lignes : des lignes diamétrales, des lignes tangentielles et une lignes circonférentielle.

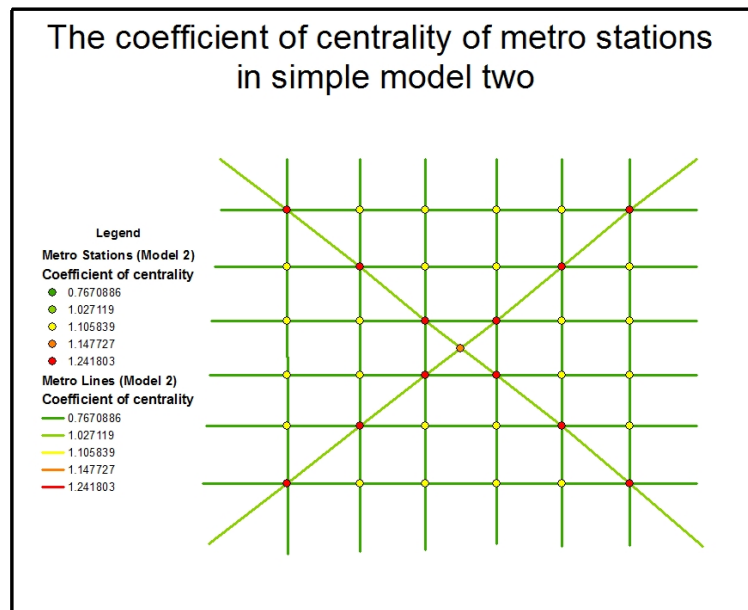
- Analyse de *centralité* sur modèle simple de métro

Nous allons montrer des résultats d'analyse de centralité sur des modèles simples de métro. Dans des figures ci-dessous, la centralité des intersections est indiquée par la couleur des points. Or, la centralité des stations simples est montrée par la couleur des lignes.



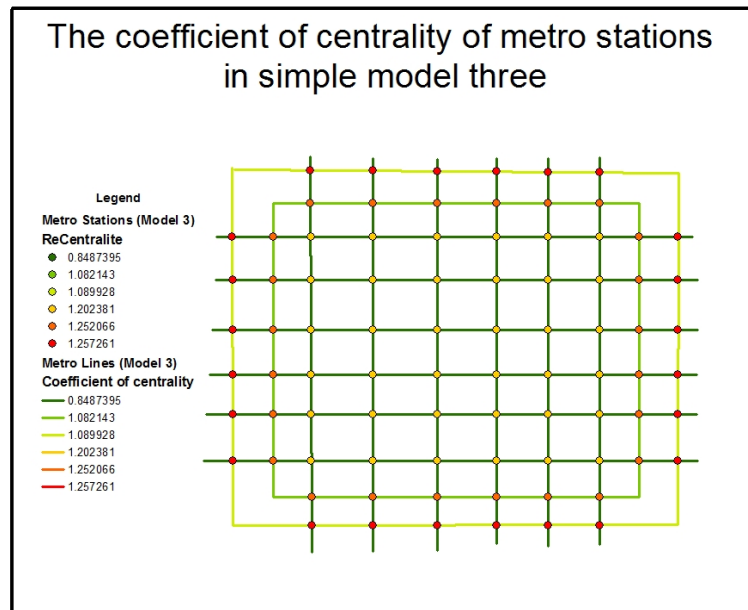
**Figure 26 Coefficient de *centralité* des stations sur modèle simple 1**

Il y a 49 intersections sur le modèle simple 1. A l'exception d'une ligne horizontale et d'une ligne perpendiculaire qui ont 19 stations simples, les autres lignes ont toutes 18 stations simples. La figure 26 présente le coefficient de *centralité* sur le modèle 1 du réseau de métro. Nous pouvons observer que des intersections sont plus centrales que des stations simples. Quand il y a le même nombre d'intersections, la ligne avec le plus de stations simples montre un coefficient de *centralité* plus élevé. L'*efficacité* du modèle 1 de métro est 0.830.



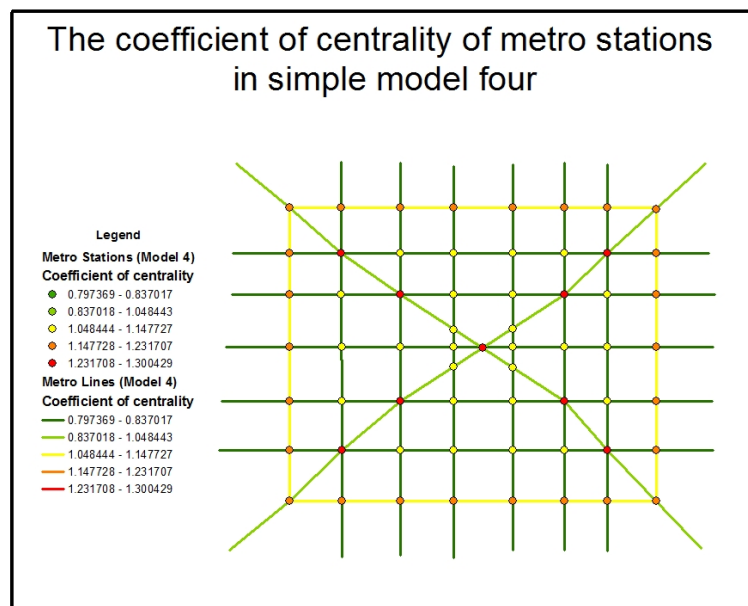
**Figure 27** Coefficient de *centralité* des stations sur modèle simple 2

Le modèle 2 a ajouté deux lignes diamétrales diagonales sur un réseau en grille identique au modèle 1. Son nombre d'intersection (37 intersections) est moindre que celui du modèle 1 (49 intersections). Le nombre de stations simples est identique sur chaque ligne (19 stations). La figure 27 présente le coefficient de *centralité* sur le modèle deux du réseau de métro. Les stations simples, ainsi que les intersections sur les lignes diagonales sont plus centrales que celles sur les autres lignes. Même si des lignes de métro sont mieux connectées par rapport au modèle 1, l'*efficacité* du modèle 2 du réseau de métro se réduit à 0.827. Cela indique que le nombre d'intersections est important pour l'*efficacité* d'un réseau de métro.



**Figure 28** Coefficient de *centralité* des stations sur modèle simple 3

Le modèle 3 est basé sur un réseau en grille auquel sont ajoutées deux lignes circulaires. Il s'agit du modèle de réseau où il y a le plus d'intersections (84 intersections). Le nombre des stations simples sur la ligne circulaire extérieure est plus élevé que ce même nombre sur la ligne circulaire intérieure. La figure 28 présente le coefficient de *centralité* sur le modèle 3 du réseau de métro. La *centralité* des lignes circulaires est bien meilleure que celle des lignes du quadrillage. La ligne circulaire avec la plus de stations simples est la plus centrale dans le réseau. L'*efficacité* du modèle du réseau de métro est de 0.949, et surpasse donc l'*efficacité* des modèles 1 et 2.



**Figure 29** Coefficient de *centralité* des stations sur modèle simple 4

Le modèle 4 est composé d'une ligne circulaire, de trois lignes diagonales et de dix lignes tangentes. Il y a 61 intersections sur ce réseau. La figure 29 présente le coefficient de *centralité* sur le modèle 4 du réseau de métro. Les stations les plus

centrales constituent des intersections entre des lignes diamétrales et des lignes tangentiels. Les stations simples plus centrales se trouvent sur la ligne circéférentielle. L'efficacité du modèle est 0.910668. Cela indique que ce modèle est bien meilleur que les modèles 1 et 2, mais moins performant que le modèle 3.

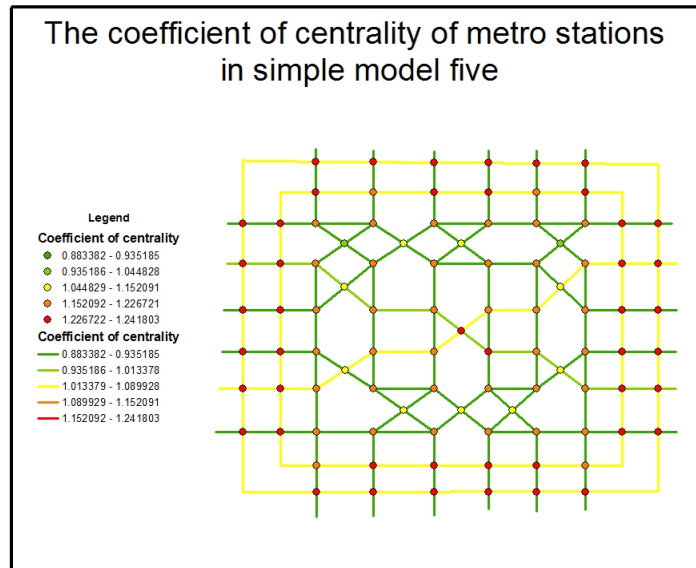


Figure 30 Coefficient de centralité des stations sur modèle simple 5

En comparant ces quatre modèles, nous pouvons observer qu'un nombre d'intersections élevé aide à augmenter l'efficacité du réseau. Afin de tester cette hypothèse, nous avons créé un modèle 5. Ce modèle est un modèle modifié basé sur le modèle 3. Nous avons ajouté des croisements de lignes au sein du réseau. Il y a 12 intersections de plus par rapport au modèle 3. La figure 30 présente le coefficient de centralité sur ce modèle 5. L'efficacité du modèle 5 est 1.07. Cela montre que le modèle 5 est bien amélioré par rapport au modèle 3.

## 2) Modèle du réseau de métro parisien

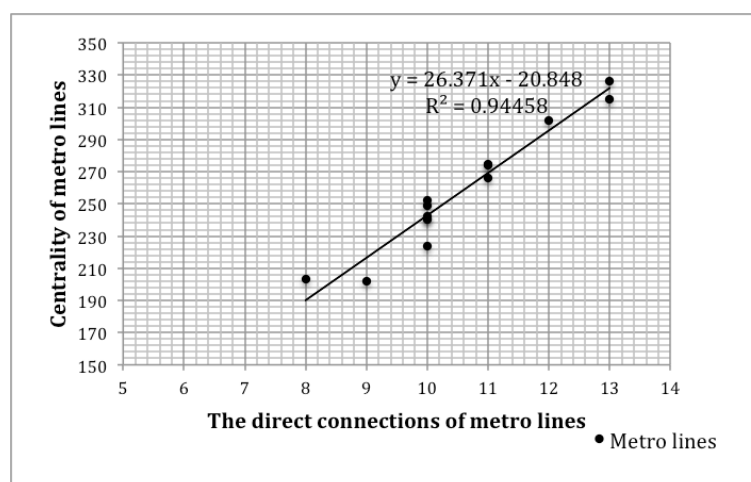


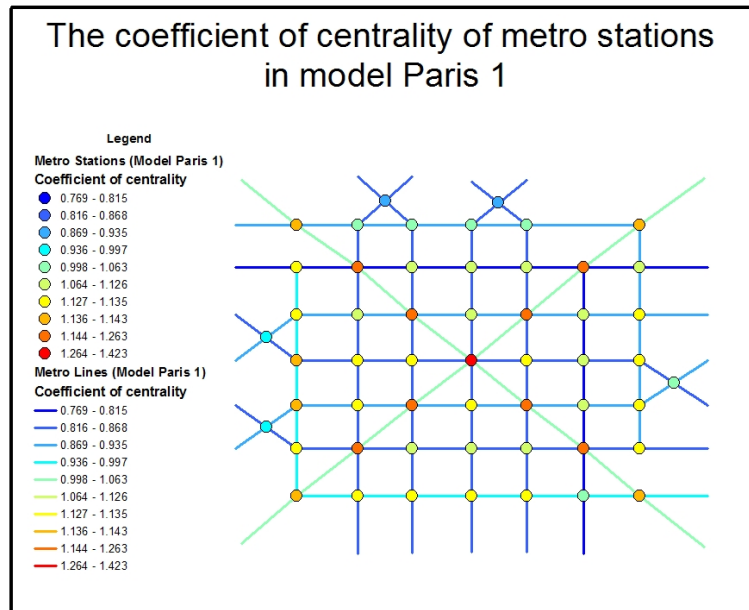
Figure 31 La centralité et connexion des lignes du métro parisien

En comparant ces modèles de réseau de métro, nous avons constaté qu'il y avait une certaine corrélation entre la centralité et la connexion des lignes du métro. Cette corrélation était également confirmée à travers l'analyse de centralité pour des



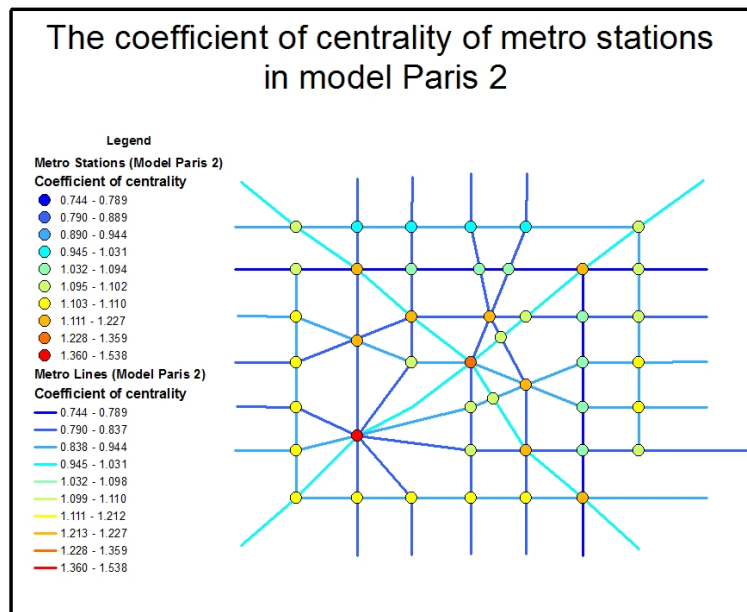
stations de métro parisien. La figure 31 montre une corrélation forte entre la *centralité* et la *connexion* des lignes du métro parisien avec un coefficient de corrélation ( $R^2$ ) de 0,945. Nous pouvons par conséquent créer des modèles de métro selon la *connexion* des lignes du métro parisien.

Parmi les 14 lignes principales du métro parisien, il y a deux lignes avec 13 connections, deux lignes avec 12 connections, deux lignes avec 11 connections, six lignes avec 10 connections, deux lignes avec 8 connections, ainsi que deux lignes avec 9 connections. Pour simplifier, nous n'avons pas considéré des lignes bis, telles que les lignes 3bis et 7bis. Selon la *connexion* du métro parisien, nous avons créé deux modèles de métro parisien.



**Figure 32 Coefficients de *centralité* des stations sur modèle 1 du métro parisien**

Dans le modèle 1 du métro parisien, il y a toujours 14 lignes et 303 stations en total, avec 53 intersections. A l'exception des lignes diagonales qui ont 17 stations simples, les autres lignes ont toutes 18 stations simples. Quant au type de lignes de métro, il y a des lignes diamétrales, des lignes tangentiels, ainsi que des lignes demi-circulaires. La figure 32 illustre les coefficients de *centralité* des stations sur ce modèle du métro parisien 1. Uniquement la catégorie de *centralité* des intersections est présentée par la couleur des points. La couleur des lignes représente la catégorie de *centralité* des stations simples. Les points rouges sont les intersections les plus centrales. Les bleus sont les stations simples les moins centrales. Nous pouvons observer que les lignes diagonales sont les meilleures parmi les lignes, dont la *centralité* des stations simples surpasse celle de certaines intersections des autres lignes. L'*efficacité* du réseau est 0.923.



**Figure 33 Coefficient de *centralité* des stations sur modèle 2 du métro parisien**

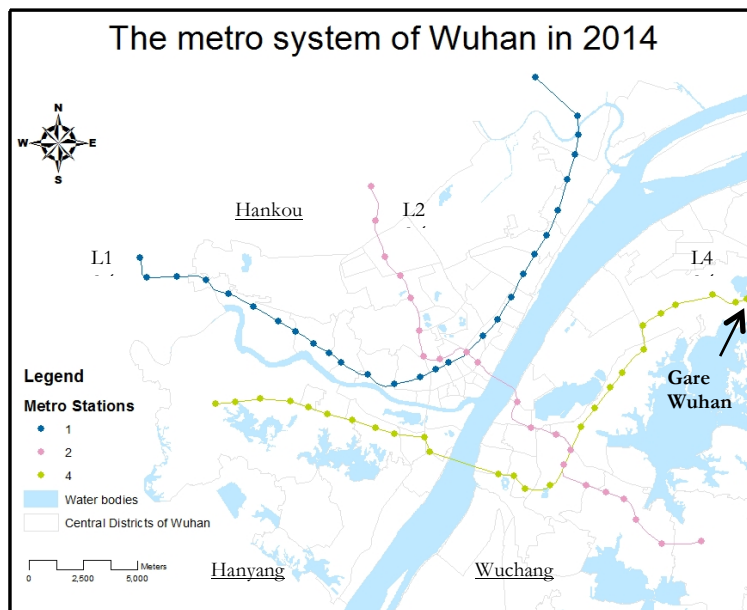
Dans le modèle 2 du métro parisien, nous avons dessiné des correspondances plus compliquées. C'est également le modèle le plus proche du métro parisien réel. Il y a deux intersections importantes au sein du réseau, qui constituent la correspondance de plusieurs lignes de métro. Ce pourrait être la station Châtelet ou République dans le métro parisien. Il y a 44 intersections sur ce modèle. La figure 33 illustre les coefficients de *centralité* des stations sur le modèle du métro parisien 2. La figure montre que la *centralité* des deux intersections est la plus élevée. Des stations simples sur ces deux lignes diagonales sont également plus centrales que les autres stations simples. L'*efficacité* du modèle deux est 0.89, inférieur à celle du modèle parisien 1. Cela montre que la *centralité* du modèle parisien 1 est plus équilibrée sur l'ensemble du réseau. Or, le modèle parisien 2 pourrait être désigné à servir, par exemple, une ville avec de grands centres commerciaux.

## VIII. Analyses sur le réseau actuel de métro de Wuhan et ses projets

Après l'analyse de *centralité* sur des modifications importantes dans le développement du réseau de métro parisien, ainsi que celle sur le réseau actuel, nous allons adopter la même méthode pour le métro de Wuhan. L'analyse de *centralité* sera appliquée sur le réseau actuel de métro à Wuhan et ses projets. Ensuite, quelques projets optionnels seront proposés pour la ville de Wuhan.

Wuhan, la capitale de la province Hubei, est la réunion de trois villes : Wuhan, Wuchang et Hanyang. Ces trois villes sont séparées par le fleuve Yangtsé et la rivière Han. La ville de Wuhan est une ville polycentrique à cause de son emplacement géographique, ainsi que pour des raisons historiques. Il y a un centre dans chacune des trois villes. Wuchang, qui se situe sur la rive droite du fleuve Yangtsé, se caractérise comme le centre d'éducation avec des universités. Hankou, qui se trouve au confluent du fleuve Yangtsé et de la rivière Han (rive nord), est le centre des affaires. Hanyang, sur l'autre rive de la rivière Han (rive sud), est le centre d'industrie de Wuhan.

## 1. Réseau actuel du métro en 2014



**Figure 34 Réseau de métro à Wuhan en 2014**

La figure 34 présente le réseau de métro à Wuhan en 2014, comprenant les lignes 1, 2 et 4. La ligne 1 est une ligne construite le long de l'ancien chemin de fer Jinghan (l'avenue de Jinghan aujourd'hui). La ligne 2 relie Hankou et Wuchang en traversant pour la première fois le fleuve Yangtsé. La ligne 4 a été ouverte à la fin de 2013 en reliant la récente gare TGV de Wuhan (au nord-est de Wuchang) et la gare historique de Wuchang (au sud-est), puis prolongée vers Hanyang. Le tableau 20 présente certaines informations sur ces lignes de métro. Ces trois lignes constituent la structure initiale du réseau de métro à Wuhan.

**Tableau 20 Caractéristiques des lignes de métro en 2014**

Ligne du métro	Type de ligne	Correspondances	District	Traverse des fleuves ?
Ligne 1	Ligne diamétrale	Ligne 4	Hankou	Non
Ligne 2	Ligne diamétrale	Pas de correspondances	Hankou, Wuchang	Oui
Ligne 4	Ligne tangentielle	Ligne 1	Wuchang	Non

Nous avons mis en application l'analyse de *centralité* pour ce réseau de métro. La figure 27 illustre le coefficient de *centralité* des stations de métro à Wuhan en 2014. Comme le réseau de métro est encore très simple, le coefficient de *centralité* pourrait être classé en seulement cinq groupes. Nous pouvons observer que la station la plus centrale est l'intersection entre la ligne 1 et 2. Des stations simples sur la ligne 2 ont un coefficient de *centralité* plus élevé que les autres stations simples. En outre, comme le nombre de ligne et de station de métro est limité, l'*efficacité* du réseau est relativement élevée ( $Eff = 1.121$ ). En général, un réseau simple a tendance à avoir un coefficient d'*efficacité* plus important.

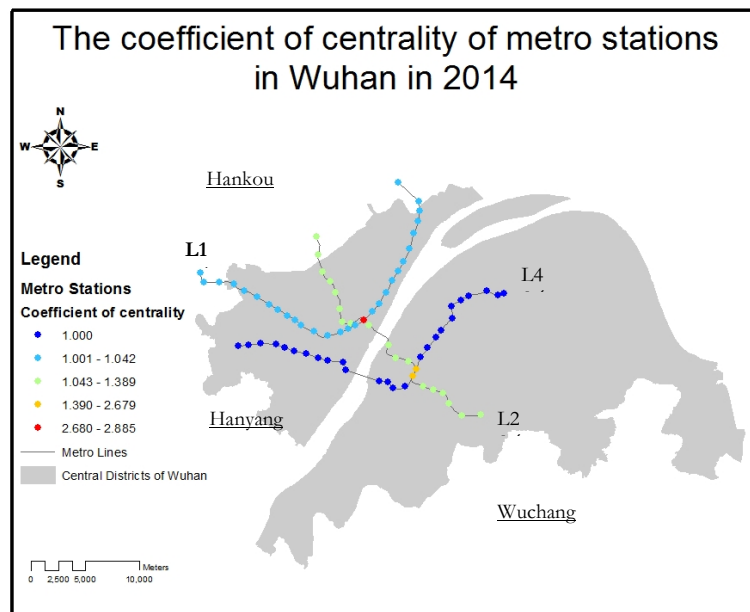


Figure 27 *Centralité* des stations de métro à Wuhan en 2014

## 2. Projet du métro en 2017

En 2017, Wuhan va mettre en service quatre nouvelles lignes. Il y aura au total 7 lignes de métro à Wuhan. Le réseau de métro va beaucoup s'élargir par rapport à celui en 2014 (cf. figure 28). Parmi les lignes de métro, cinq lignes passent à Hankou, quatre à Wuchang et trois à Hanyang. La densité des stations de métro va augmenter notamment dans la ville de Hankou. En 2017, le nombre total de stations de métro va doubler de 75 à 149 stations. En outre, le nombre d'intersections va augmenter de 3 à 23. Sauf les lignes 1 et 3, toutes les autres lignes traversent de grands cours d'eau. Du point de vue de la *connexion*, les ligne 2, 3 et 7 sont les mieux connectées : elles ont au moins un changement avec toutes les autres lignes.

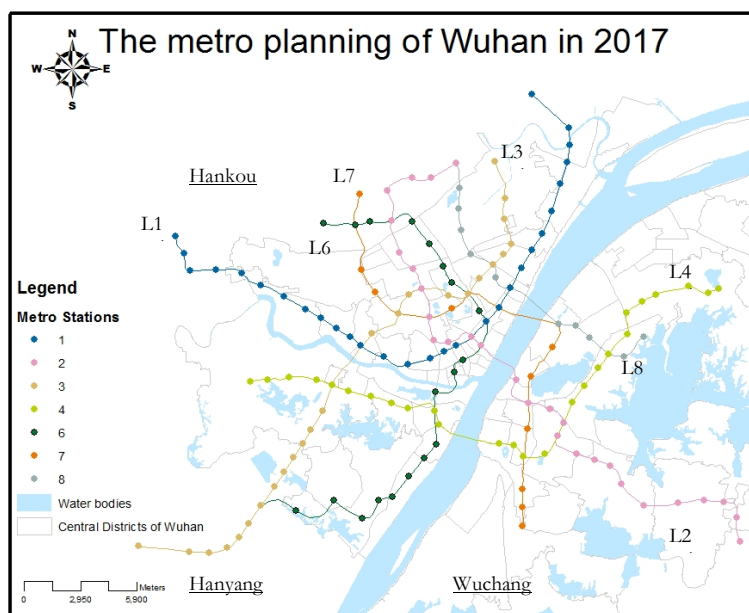


Figure 28 Projet du réseau de métro à Wuhan en 2017

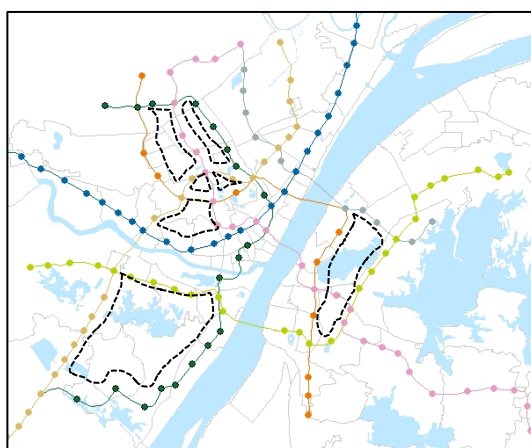


Figure 28bis « Cercles » dans le réseau de métro à Wuhan en 2017

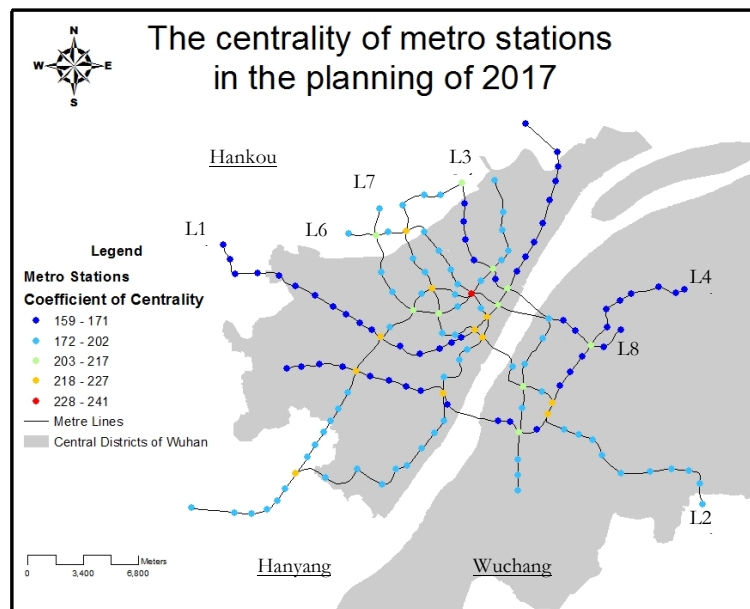
Comme présenté dans le tableau 21, la plupart des lignes de métro sont des lignes diamétrales. Comme Wuhan est une ville polycentrique, les lignes diamétrales qui traverse des centres villes de Wuhan pourraient aider à faciliter des trajets et renforcer l'intégration entre les trois villes. La ligne 8, une ligne tangentielle, complète le réseau en servant des trajets entre Hankou et Wuchang. Comparé avec celui de 2014, ce réseau de métro est beaucoup mieux développé, mais le type de



lignes est toujours limité. Par exemple, il n'y a pas de ligne circonférentielle ou radiale dans ce réseau. Par contre, il apparaît que des petites «cercles» de lignes sont formés par trois ou plusieurs lignes de métro (cf. figure 28bis).

**Tableau 21 Caractéristiques des lignes du métro à Wuhan en 2017**

Ligne du métro	Type de ligne	Correspondances	District	Traverse des fleuves ?
Ligne 1	Ligne diamétrale	Ligne 4	Hankou	Non
Ligne 2	Ligne diamétrale	Pas de correspondances	Hankou, Wuchang	Oui
Ligne 3	Ligne diamétrale	Pas de correspondances	Hankou, Wuchang	Oui
Ligne 4	Ligne diamétrale	Ligne 1	Wuchang, Hanyang	Oui
Ligne 6	Ligne diamétrale	Ligne 8	Hankou, Hanyang	Oui
Ligne 7	Ligne diamétrale	Pas de correspondances	Hankou, Wuchang	Oui
Ligne 8	Ligne tangentielle	Ligne 6	Hankou, Wuchang	Oui



**Figure 29 Centralité des stations de métro en planification à Wuhan en 2017**

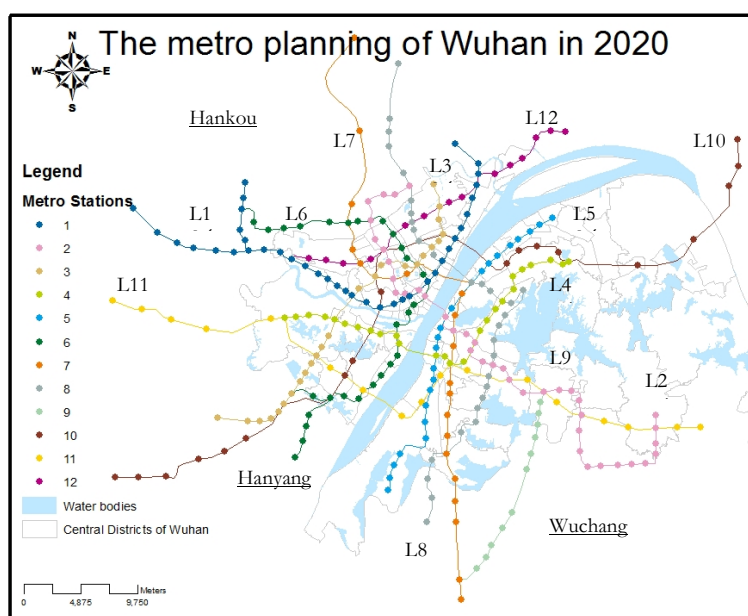
La figure 29 présente la *centralité* des stations de métro à Wuhan en 2017. Nous pouvons constater que la station Xianggang Lu, intersection des lignes 3, 6 et 7, a le

coefficient de *centralité* le plus élevé dans le réseau. Des stations simples sur les lignes 1, 4 et 8 sont les stations les moins centrales.

Dans le projet du réseau de métro en 2017, la *connexion* entre des lignes a eu une augmentation importante par rapport à 2014. Sauf pour les lignes 1, 4, 6 et 8, seulement un changement est nécessaire pour rejoindre toutes les autres lignes. L'*efficacité* du réseau est 1.175, qui est plus élevée par rapport à l'*efficacité* du réseau en 2014.

### 3. Projet du métro en 2020

En 2020, le réseau de métro à Wuhan sera prolongé vers les banlieues. outre les extensions des lignes 1, 2, 6, 7 et 8, cinq nouvelles lignes seront créées, telles que les lignes 5, 9, 10, 11 et 12 (cf. figure 30).



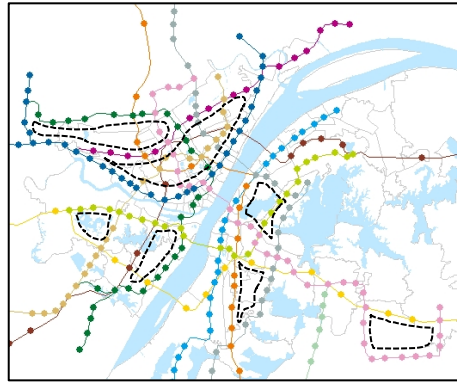
**Figure 30** Projet du réseau de métro en planification à Wuhan en 2020

Le tableau 22 montre que, en 2020, le type de ligne principal dans le projet du réseau de métro à Wuhan est toujours la ligne diamétrale. Les lignes 8, 9 et 12 sont des lignes tangentielles. En outre, il y a des extensions en extrémité des lignes 1 et 6 formant des lignes branches. En général, les lignes qui se trouvent entièrement dans une ville ont moins de correspondances, telles que les lignes 1, 5, 9 et 12. La ligne 9 est connectée seulement avec trois autres lignes. De plus, cette dernière se trouve loin du centre ville. Elle se connectera avec une extrémité de la ligne 7 d'un côté, et se croisera avec les lignes 2 et 11 à leur intersection d'un autre côté.

**Tableau 22** Caractéristiques des lignes du métro en planification à Wuhan en 2020

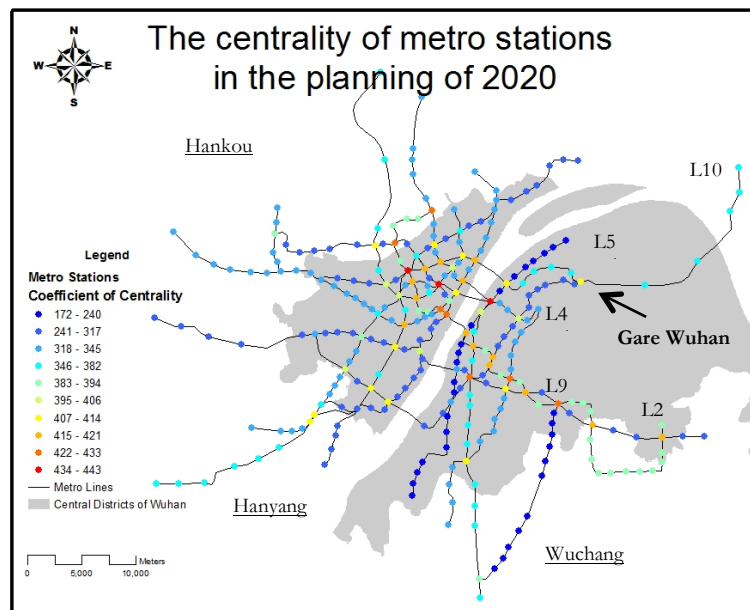
Ligne du métro	Type de ligne	Correspondances	District	Traverse des fleuves ?
Ligne 1	Ligne diamétrale,	Ligne 4, Ligne 5, Ligne 9 et Ligne 11	Hankou	Non

	ligne branche			
Ligne 2	Ligne diamétrale	Pas de correspondance	Hankou et Wuchang	Oui
Ligne 3	Ligne diamétrale	Ligne 5 et Ligne 9	Hankou et Hanyang	Oui
Ligne 4	Ligne diamétrale	Ligne 1	Wuchang et Hanyang	Oui
Ligne 5	Ligne diamétrale	Ligne 1, Ligne 3, Ligne 6, Ligne 9 et Ligne 12	Wuchang	Non
Ligne 6	Ligne diamétrale, ligne branche	Ligne 8	Hankou et Hanyang	Oui
Ligne 7	Ligne diamétrale	Pas de correspondance	Hankou et Wuchang	Oui
Ligne 8	Ligne tangentielle	Ligne 6	Hankou et Wuchang	Oui
Ligne 9	Ligne tangentielle	Ligne 1, Ligne 3, Ligne 4, Ligne 5, Ligne 6 et Ligne 8	Wuchang	Non
Ligne 10	Ligne diamétrale	Pas de correspondance	Wuchang, Hankou et Hanyang	Oui
Ligne 11	Ligne diamétrale	Ligne 1 et Ligne 12	Wuchang et Hanyang	Oui
Ligne 12	Ligne tangentielle	Ligne 4, Ligne 5 et Ligne 11	Hankou	Non



**Figure 30bis « Cercles » dans le réseau de métro à Wuhan en 2020**

Les lignes bien connectées sont les lignes 2, 7 et 10. Ces trois lignes ont des correspondances avec toutes les autres lignes. D'ailleurs, la ligne 10 est la ligne la plus longue qui traverse les trois villes de Hanyang, Hankou et Wuchang. Il y a huit lignes qui passent à Hankou et Wuchang, et cinq lignes à Hanyang. En 2020, il n'y aura toujours pas de ligne circonférentielle dans le réseau de métro à Wuhan. Par contre, certaines lignes se croiseront en constituant des petites boucles au sien du réseau. Par exemple, les ligne 4 et 11 forment une boucle dans les villes de Wuchang et Hanyang; les ligne 1 et 12 se croisent à Hankou en formant une boucle (cf. figure 30bis).



**Figure 31 Centralité des stations de métro en planification à Wuhan en 2020**

La figure 31 présente le coefficient de *centralité* des stations de métro à Wuhan en 2020. Les stations les plus centrales dans le réseau sont toutes des intersections (y compris deux gares): Gare de Hankou, Xianggang Road, Xu Jiapeng, Wangjia Dun et Gare de Wuchang. Par contre, la nouvelle gare TGV de Wuhan (au nord-est de Wuchang, à l'intersection des lignes 4 et 10), montre un coefficient de *centralité* comparativement faible. Les stations simples les plus centrales se trouvent sur la ligne 2. La *centralité* des stations simples sur les lignes 5 et 9 est la plus faible. Ces deux lignes ont comparativement moins de connections avec les autres lignes.

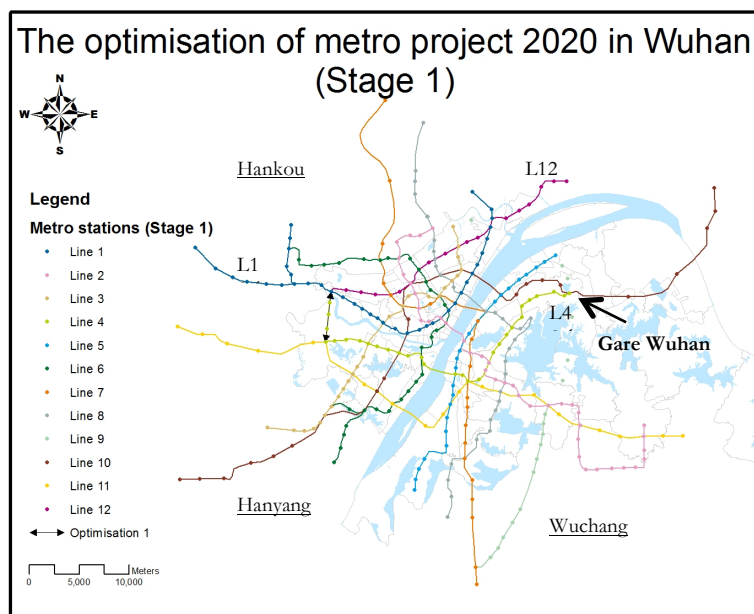
#### 4. Projet optionnel pour le métro de Wuhan

Après les analyses dans des sections précédentes, nous connaissons la distribution de la *centralité* sur le réseau actuel de métro à Wuhan, ainsi que sur ses projets. Nous avons trouvé également qu'il y a une corrélation positive entre la *centralité* et la *connexion*.

En 2020, les lignes 2 et 7 auront les meilleures *connexions* dans le réseau de métro. Par contre, la ligne 9 n'a pas la *connexion* directe avec huit lignes de métro. Les autres lignes de métro avec une *connexion* faible sont les lignes 1, 5 et 12. Elles n'ont pas de correspondance avec quatre lignes de métro. Concernant la distribution des stations de métro, les stations à Hankou sont plus serrées que celles à Wuchang et Hanyang. En outre, plus d'intersections se concentrent à Hankou.

Dans cette section, nous allons proposer des projets optionnels basés sur le projet de métro en 2020 à Wuhan. Il est espéré que ces projets puissent améliorer l'*efficacité* du réseau de métro à Wuhan.

##### 1) Étape 1 du projet optionnel pour le métro de Wuhan



**Figure 32** Projet optionnel (étape 1) pour le métro de Wuhan

La figure 32 présente l'étape 1 du projet optionnel pour le métro de Wuhan. Dans cette étape, le changement est principalement sur la ligne 4. La ligne 4 traverse Wuchang et Hanyang, en connectant des gares importantes, telles que la nouvelle gare TGV de Wuhan, la gare de Wuchang, la gare de Hanyang et une nouvelle gare à Hanyang, qui sera construite dans un futur proche. Pour cette raison la ligne 4 joue un rôle important dans le réseau de métro. Pourtant, cette ligne n'a pas de croisement avec les lignes 1 et 12. Ces dernières lignes n'ont pas non plus la meilleure *connexion*. C'est pourquoi dans l'étape 1 du projet optionnel, nous allons prolonger la ligne 4 côté ouest en ajoutant trois stations simples pour joindre l'intersection DuoLuokou des lignes 1 et 12 (cf. figure 32).



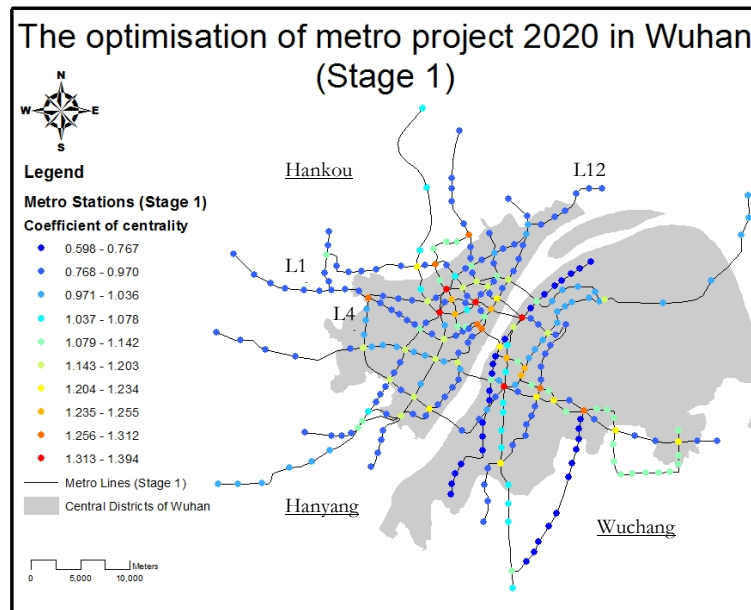
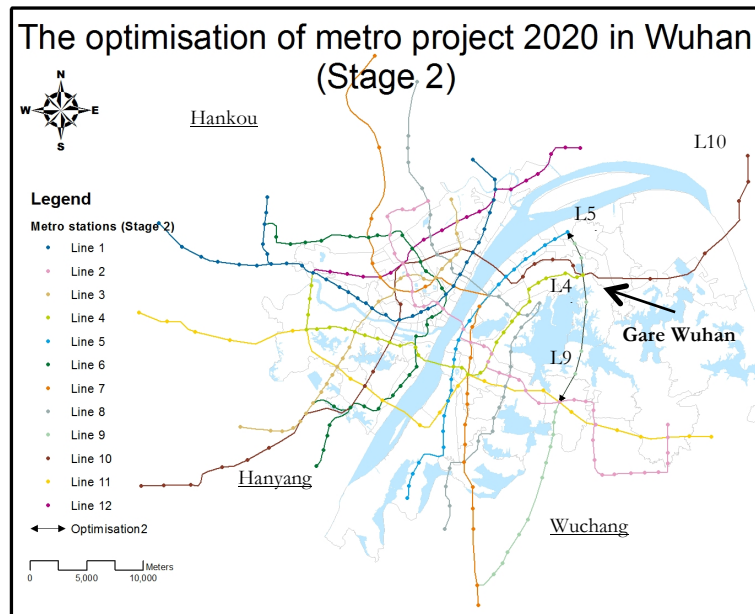


Figure 33 Analyse de *centralité* sur le projet optionnel (étape 1)

La figure 33 montre le résultat d'analyse de *centralité* sur l'étape 1 du projet optionnel. En comparant avec le projet de métro en 2020, cette modification n'a pas changé l'importance des principales intersections du réseau. Par exemple, les stations les plus centrales dans le réseau restent identiques. Par contre, ce prolongement influence l'importance de stations simples. La *centralité* des stations simples sur la ligne 4 a augmenté de 0.878 à 1.032. Il y a également une croissance de *centralité* sur les lignes 1 et 12. Il paraît que la *centralité* sur d'autres lignes a une légère diminution relative. L'*efficacité* du réseau est montée à 0.969 en comparant à la précédente (Eff = 0.946).

## 2) Étape 2 du projet optionnel pour le métro de Wuhan



**Figure 34** Projet optionnel (étape 2) pour le métro de Wuhan

Comme indiqué dans les sections précédentes, la ligne 9 a une mauvaise *connexion* dans le réseau. Dans des étapes suivantes, nous allons apporter des changements principalement sur la ligne 9. Dans l'étape 2, la ligne 9 va se prolonger en croisant les lignes 4 et 10 à leur intersection à la nouvelle Gare TGV de Wuhan, et puis continuer pour joindre le terminus de la ligne 5. La figure 34 illustre cette étape du projet optionnel. Il y aura cinq nouvelles stations simples et une nouvelle intersection ajoutées. Ce changement peut augmenter la *connexion* des lignes 4, 5, 9 et 10. Il va également renforcer l'importance de la nouvelle gare TGV de Wuhan.

La figure 35 monte le résultat d'analyse de *centralité* sur l'étape 2 du projet optionnel. Nous pouvons observer que la *centralité* de la nouvelle gare TGV de Wuhan a beaucoup augmenté après sa *connexion* avec le prolongement de la ligne 9. Les intersections importantes n'ont pas beaucoup changé par rapport à l'étape 1. Par contre, la *centralité* des stations simples sur certaines lignes évolue. Par exemple, des stations simples sur les lignes 1, 3, 4, 8, 10 et 11 sont devenues plus importantes qu'auparavant. La *centralité* des stations simples sur la ligne 9 est également plus élevée, mais elles restent encore très faibles dans le réseau. L'*efficacité* du réseau de métro est 0.973. Cela indique que l'*efficacité* du réseau est améliorée par rapport à l'étape 1 (0.969).

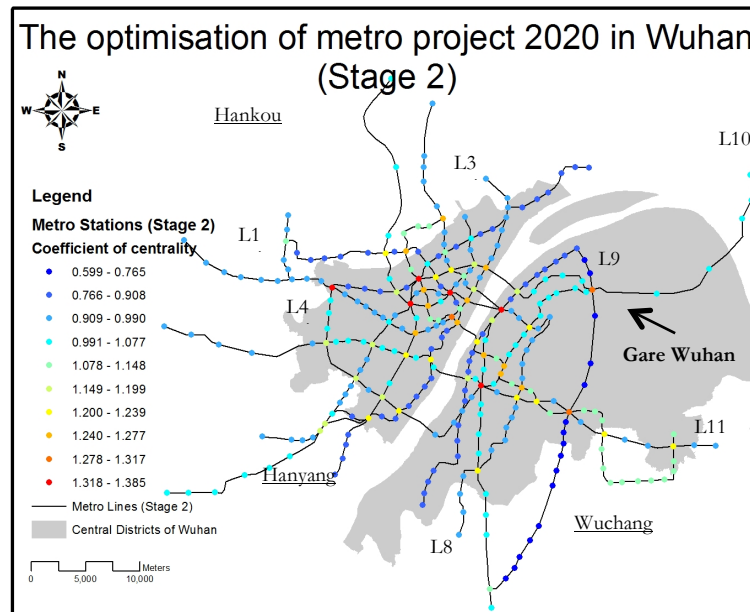
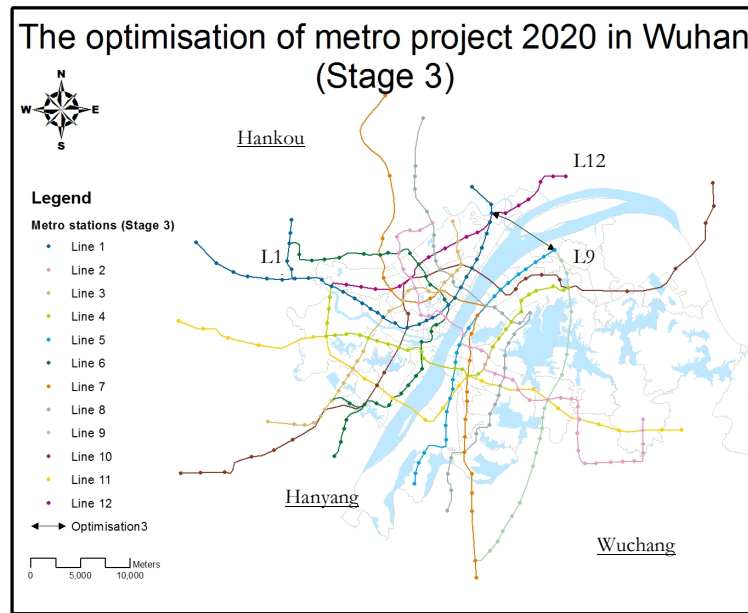


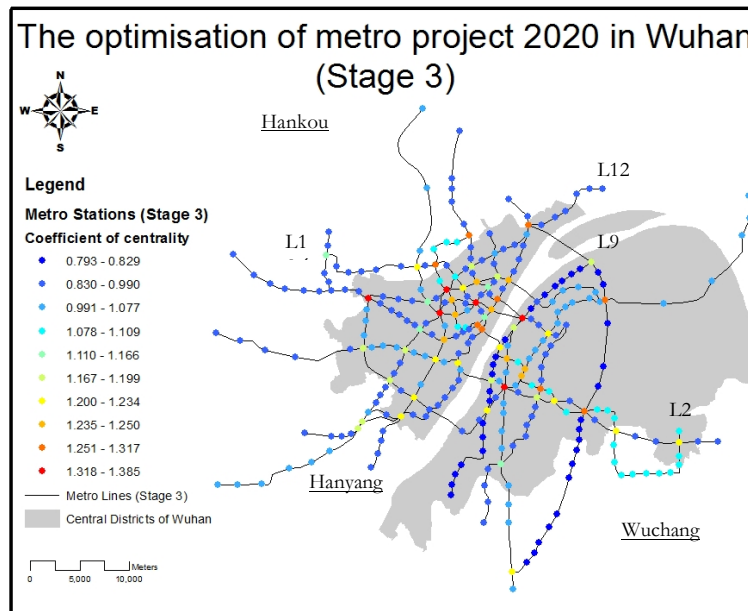
Figure 35 Analyse de *centralité* sur le projet optionnel (étape 2)

### 3) Étape 3 du projet optionnel pour le métro de Wuhan



**Figure 36** Projet optionnel (étape 3) pour le métro de Wuhan

Dans l'étape 3 du projet optionnel, nous allons continuer à améliorer la ligne 9. La figure 36 illustre le changement du réseau. La ligne 9 sera prolongée en traversant le fleuve Yangtzi et puis joindre l'intersection Teng Zigang des lignes 1 et 12. Dans cette étape, aucune station simple ou intersection n'est ajoutée, mais une nouvelle connexion des lignes 1, 9 et 12 sera créée.

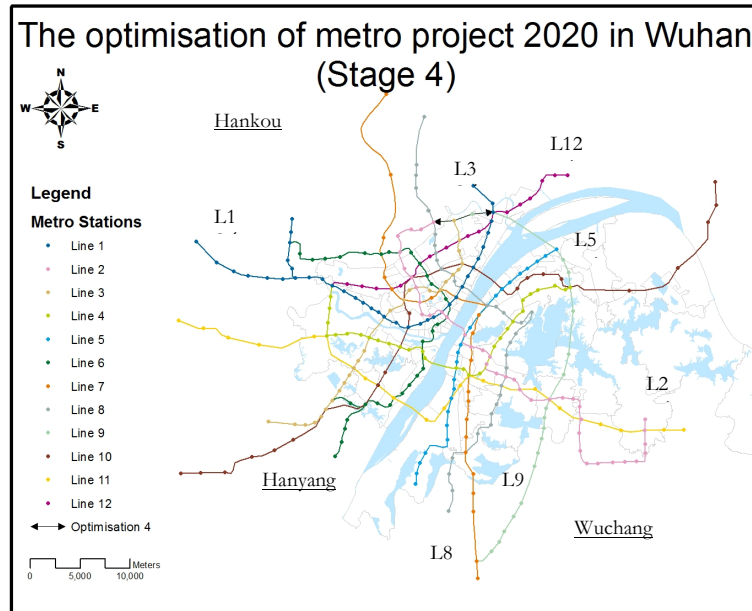


**Figure 37** Analyse de *centralité* sur le projet optionnel (étape 3)

La figure 37 présente le résultat d'analyse de *centralité* sur l'étape 3 du projet optionnel. Selon la présentation des couleurs de la classification de *centralité*, il semble que la *centralité* des stations simples sur plusieurs lignes de métro a baissé. En réalité, après l'observation directe sur des coefficients de *centralité*, nous pouvons constater que la *centralité* des stations simples sur la plus part des lignes reste

constante, sauf une augmentation sur les lignes 1, 9 et 12. Malgré ces augmentations, ces lignes sont classifiées comme des lignes les moins centrales. Par rapport aux intersections, il n'y a pas eu de grand changement en terme de *centralité*. Certaines intersections sur les lignes 2 et 9 sont améliorées. L'*efficacité* du réseau (Eff = 0.993) dans l'étape 3 surpasse celle de l'étape précédente (Eff = 0.973).

#### 4) Étape 4 du projet optionnel pour le métro de Wuhan

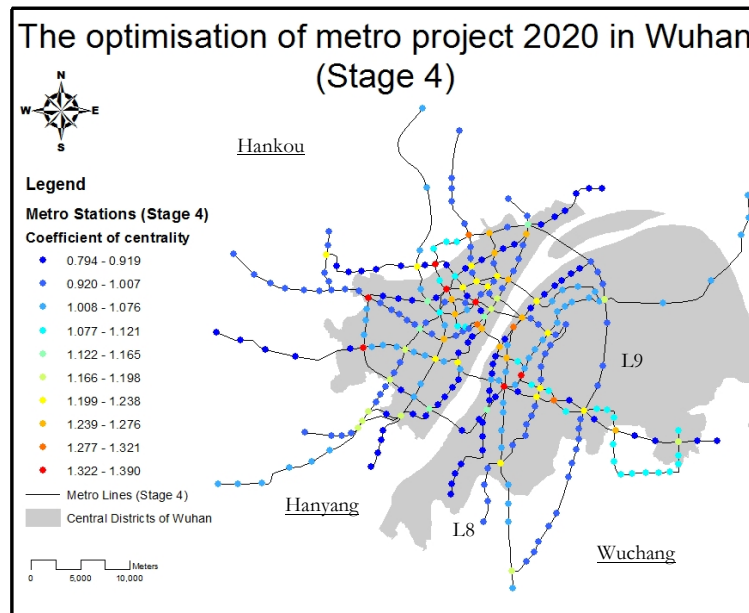


**Figure 38 Projet optionnel (étape 4) pour le métro de Wuhan**

La figure 38 présente l'étape 4 du projet optionnel. Après les étapes précédentes, la *connexion*, ainsi que la *centralité* de la ligne 9 est bien améliorée. Cependant, cette dernière est toujours un point faible dans le réseau. C'est pour cette raison que nous allons continuer le prolongement de la ligne 9 en connectant le terminus de la ligne 3, station Citizens Home, puis en joignant l'intersection des lignes 2 et 8 Hongtu Boulevard. Une station simple et une intersection seront ajoutées. Cela va optimiser la *connexion* des lignes 3, 8 et 9, car ces stations seront les premières correspondances entre ses lignes.

Après cette étape, le réseau de métro à Wuhan sera bien optimisé. Les ligne 2 et 9 vont constituer une demi-cercle qui desservira la partie nord-est de Wuchang et Hanyang. Les lignes qui manquent de correspondances entre elles seront principalement des lignes parallèles qui se situent au bord des différents cours d'eau, telles que les lignes 1 et 5, ou les lignes 3 et 12.





**Figure 39** Analyse de *centralité* sur le projet optionnel (étape 4)

La figure 39 illustre le résultat d'analyse de *centralité* sur l'étape 4 du projet optionnel. Des stations simples sur la ligne 9 ne sont pas classifiées pour la première fois dans la catégorie des stations les moins centrales. La *centralité* des stations simples sur la ligne 8 est également plus élevée. Des stations simples sur les autres lignes demeurent stationnaires. Le changement des lignes dans cette étape a influencé plus les intersections que les stations simples. Les intersections les plus centrales ne se concentrent plus seulement au centre ville, mais aussi apparaissent aussi vers la périphérie. Après plusieurs étapes du prolongement, la ligne 9 est devenue une ligne demi-circonférentielle. Cela a apparemment influencée l'importance de certaines stations dans le réseau. L'*efficacité* du réseau est montée à 1.007.

## IX. Discussion et conclusion

Dans cette recherche, nous avons tout d'abord étudié l'évolution du réseau de métro parisien en analysant quatre cas d'étude en deux étapes : avant et après des modifications. Le réseau de métro parisien a été historiquement modifié à plusieurs reprises non seulement dans la planification, mais aussi dans le processus de développement. L'analyse de *centralité* sur ces étapes différentes nous permet de comprendre l'impact de ces changements sur l'ensemble du réseau. Ces importants changements de réseau incluent : la jonction entre Châtelet et Raspail sur la ligne 4, le prolongement de la ligne 7 par intégration d'un tronçon appartenant initialement à la ligne 10, le remplacement et le report de sections entre les lignes 8, 10 et 14, ainsi que la section de la ligne 5 affectée à la ligne 6.

Des résultats d'analyse montrent que, après certains changements, le réseau de métro parisien est amélioré. Par exemple, dans le cas d'étude 2, la *centralité* des stations sur plusieurs lignes de métro a augmenté. L'*efficacité* du réseau est également plus élevée qu'avant. Par ailleurs, même si des changements des lignes 5, 8 et 9 dans le cas d'étude 3 sont plus compliqués dans ces quatre cas d'étude, l'effet de la modification n'est pas évident, avec seulement un légère augmentation de l'*efficacité* de 0.850 à 0.856.

Par contre, l'impact des changements du réseau dans les cas d'étude 1 et 4 est comparativement négatif sur l'ensemble du réseau. Dans le cas d'étude 1, malgré le renforcement de *centralité* des intersections, l'*efficacité* du réseau diminue. Cela implique que l'augmentation du nombre de stations simple pourrait réduire l'*efficacité* du réseau. Dans le cas d'étude 4, bien que la modification des lignes ait amélioré la *centralité* de la ligne 6, il y a eu baisse de la *centralité* sur plusieurs lignes de métro. L'*efficacité* du réseau a diminué de 0.860 à 0.841.

Dans la partie suivante, nous avons analysé la *centralité* des stations dans le réseau actuel du métro parisien. Nous avons constaté que les intersections ont des coefficients plus importants que des stations simples. Les cinq stations plus centrales sont : République, Châtelet, Opéra, Nation et Montparnasse-Bienvenue. Nous avons également analysé la *centralité* avec des correspondances entre le réseau de métro et des stations RER. Cela a mis en avant certaines intersections. Mais le réseau avec RER est beaucoup moins efficace que celui de métro simple. C'est parce qu'il y a beaucoup de stations simples de RER au banlieue parisiens. Ces stations simples réduisent le coefficient d'*efficacité* du réseau.

La comparaison de l'indicateur de *centralité* avec la densité du trafic entrant, donne des résultats intéressants. La majorité des stations à fort trafic entrant sont aussi des intersections. Nous pouvons observer que la densité du trafic entrant des intersections est bien plus significative que celle des stations simples. Les cinq stations les plus importantes en termes de densité du trafic entrant sont Saint-Lazare, Gare du Nord, Montparnasse-Bienvenue, Châtelet et République. On constate que le coefficient de *centralité* des stations a une bonne cohérence avec la densité du trafic. La *centralité* pourrait bien indiquer la spécification des certaines stations importantes.

De plus, nous pouvons observer un « effet de pompage » des intersections sur les stations simples alentour. C'est-à-dire que le coefficient de *centralité* ainsi que la densité du trafic entrant diminuent autour des intersections. Des stations simples situées autour des gares parisiennes ont un trafic entrant relativement plus important que leur coefficient de *centralité*. Cela indique qu'il faut considérer également l'impact des voyageurs venant en trains.

Au contraire, dans certains cas, l'influence du RER est surestimée. Par exemple, la *centralité* de la station Invalides est importante, mais sa densité de trafic est relativement faible. L'influence du RER C sur le trafic à cette station n'est donc pas très importante. Un autre exemple est la station Porte Dauphine, qui est considérée comme une correspondance avec la station de RER C Avenue Foch. Mais la *connexion* entre ces deux stations n'est pas tout à fait accessible pour les voyageurs. Nous avons par conséquent besoin d'analyser les cas plus précisément quand il s'agit de deux réseaux différents.

Dans des analyses précédentes sur le réseau du métro parisien, nous avons trouvé une corrélation forte entre la *centralité* et la *connexion* des lignes de métro. Selon ce résultat, nous avons créé des modèles simples de métro, ainsi que deux modèles inspirés du métro parisien. Dans l'analyse de *centralité* sur des modèles simples, nous avons constaté qu'un plus grand nombre d'intersections pourrait augmenter l'*efficacité* du réseau. Sur une ligne, quand il y a le même nombre d'intersections, la ligne avec le plus de stations simples montre un coefficient de *centralité* plus élevé. Par rapport aux modèles de métro parisien, les résultats montrent que la *centralité* du

modèle 1 est plus équilibrée sur l'ensemble du réseau ; le modèle 2 pourrait être destiné à desservir une ville avec des grands centres commerciaux.

Après ces résultats d'analyses sur le métro parisien, nous avons entrepris l'analyse du réseau actuel de métro de Wuhan et de ses projets. Les résultats d'analyse indiquent que l'*efficacité* du réseau de métro à Wuhan sera de plus en plus en éléevée de 2014 à 2020. Dans le projet de 2020, les stations les plus centrales sont toutes des intersections : Gare de Hankou, Xianggang Road, Xu Jiapeng, Wangjia Dun et nouvelle gare TGV de Wuchang. La ligne de métro la moins centrale est la ligne 9. Les lignes 1, 5 et 12 ont également une *connexion* faible.

**Tableau 23 Nombre de *connexions* de ligne de métro dans le projet 2020 et le projet optionnel**

<b>Ligne Projets</b>	<b>L1</b>	<b>L 2</b>	<b>L 3</b>	<b>L 4</b>	<b>L 5</b>	<b>L 6</b>	<b>L 7</b>	<b>L 8</b>	<b>L 9</b>	<b>L 10</b>	<b>L11</b>	<b>L 12</b>
<b>Projet 2020</b>	7	11	9	8	7	8	11	9	3	10	9	7
<b>Projet optionnel</b>	9	11	10	11	8	8	11	10	9	11	9	9

Afin d'améliorer le projet de Wuhan en 2020, nous avons proposé un projet optionnel en quatre étapes. Il s'agit principalement de l'amélioration des lignes 4 et 9. En comparant avec le projet de métro à Wuhan en 2020, la *connexion* des plusieurs lignes de métro augmente dans cette variante, notamment la ligne 9 (cf. tableau 23). L'*efficacité* du réseau est augmenté à 1.007 comparant avec celle du projet en 2020 (Eff = 0.946).

Bien entendu les propositions pour l'adaptation du réseau de métro de Wuhan seraient à croiser avec la situation géographique (et notamment le coût de traversée du fleuve Yangzi), comme avec la situation urbaine actuelle ou prévue. Ainsi l'augmentation de *centralité* de certaines stations de correspondance serait de nature à augmenter la capacité du secteur à évoluer en centre urbain secondaire, et la création de nouvelles stations simples vers une densité d'habitat plus élevée.

Enfin, nous pouvons conclure que l'analyse de *centralité* pourrait indiquer l'importance relative des stations de métro dans un réseau. Cela pourrait permettre aux urbanistes et designers estimer le trafic entrant des stations. Éventuellement, cet indicateur pourrait d'être adopté pour analyser et comparer des projets différents du réseau de métro.

## X. Bibliographique

Angeloudis, P. and D. Fisk (2006). "Large subway systems as complex networks." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **367**(0): 553-558.

Bagheri, N., A. Holt and G. Benwell (2009). "Using Geographically Weighted Regression to Validate Approaches for Modelling Accessibility to Primary Health Care." Applied Spatial Analysis and Policy **2**(3): 177-194.

Bonnin, P. and S. Douady (2013). "Morphogenèse du réseau viaire." Les réseaux dans le temps et dans l'espace.

Bordin, P. (2006). Méthode d'observation multi-niveaux pour le suivi de phénomènes géographiques avec un SIG, l'Université de Marne-La-Vallée.

Brabyn, L. and P. Gower (2004). "Comparing Three GIS Techniques for Modelling Geographical Access to General Practitioners." Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization **39**(2): 41-49.

Bureau, B. and M. Glachant (2011). "Distributional effects of public transport policies in the Paris Region." Transport Policy **18**(5): 745-754.

Courtat, T., S. Douady and C. Gloaguen (2011). Centrality maps and the analysis of city street networks. Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. Paris, France, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering): 316-321.

Cromley, E. K. and S. L. McLafferty (2002). GIS and public health. New York, Guilford Publications.

Courtat, T. (2012). Walk on City Maps - Mathematical and Physical phenomenology of the City, a Geometrical approach. Doctor, Université Paris-Diderot - Paris VII.

Christaller, W. (1975). La théorie des lieux centraux, CRU.

Courtat, T., S. Douady and C. Gloaguen (2011). Centrality maps and the analysis of city street networks. Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. Paris, France, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering): 316-321.

Derrible, S. and C. Kennedy (2009). "Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **No.2112**.

Derrible, S. and C. Kennedy (2010). "Evaluating, Comparing, and Improving Metro Networks." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **No.2146**.

Derrible, S. (2012). "Network Centrality of Metro Systems." PLoS ONE **7**(7): e40575.

- Dutt AK, Dutta HM, Jaiswal J and M. C (1986). "Assessment of service adequacy of primary health care physician in a two county region of Ohio, U.S.A. ." GeoJournal **12**: 443-455.
- Gattuso, D. and E. Miriello (2005). "Compared Analysis of Metro Networks Supported by Graph Theory." Networks and Spatial Economics **5**(4): 395-414.
- Higgs, G. and M. Gould (2001). "Is there a role for GIS in the 'new NHS'?" Health & Place **7**(3): 247-259.
- Joseph, A. E. and P. R. Bantock (1982). "Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: A method and case study." Social Science & Medicine **16**(1): 85-90.
- Lagesse, C. (2015). Lire les lignes de la ville : méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux. Doctor, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Laporte, G., J. A. Mesa and F. A. Ortega (2000). "Optimization methods for the planning of rapid transit systems." European Journal of Operational Research **122**(1): 1-10.
- Laporte, G., J. A. Mesa, F. A. Ortega and F. Perea (2011). "Planning rapid transit networks." Socio-Economic Planning Sciences **45**(3): 95-104.
- Lovett, A., R. Haynes, G. Sunenberg and S. Gale (2002). "Car travel time and accessibility by bus to general practitioner services: a study using patient registers and GIS." Social Science & Medicine **55**(1): 97-111.
- Luo, W. and Y. Qi (2009). "An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians." Health & Place **15**(4): 1100-1107.
- Luo, W. and F. Wang (2003). "Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study in the Chicago region." Environment and Planning B: Planning and Design **30**(6): 865-884.
- Liu, Y. and Y. Tan (2013). "Complexity Modeling and Stability Analysis of Urban Subway Network: Wuhan City Case Study." Procedia - Social and Behavioral Sciences **96**(0): 1611-1621.
- McLafferty, S. and S. Grady (2004). "Prenatal Care Need and Access: A GIS Analysis." J. Med. Syst. **28**(3): 321-333.
- McLafferty, S. L. (2003). "GIS and health care." Annual Review of Public Health **24**: 25-42.
- MERLIN, P. and F. CHOAY (1988). Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. Paris, PUF: p.118-119.
- Newman, M. E. J. (2010). Networks: An Introduction. Oxford, UK, Oxford University Press.

- Perna, A., P. Kuntz and S. Douady (2011). "Characterization of spatial network-like patterns from junction geometry." Physical Review E **vol. 83**(Issue 6).
- Radke, J. and L. Mu (2000). "Spatial Decompositions, Modeling and Mapping Service Regions to Predict Access to Social Programs." Annals of GIS **6**(2): 105 - 112.
- RATP. (2013). "Plateforme opendata de la RATP." Retrieved January, 15, 2013, from <http://data.ratp.fr>.
- Rushton G. (1999). "Methods to evaluate geographic access to health services." Journal of Public Health Management and Practice **5**(2): 93-100.
- Shen, L., L. Jiao, B. He and L. Li "Evaluation on the utility efficiency of metro infrastructure projects in China from sustainable development perspective." International Journal of Project Management(0).
- Sevtsuk, A. (2010). Path and Place: A Study of Urban Geometry and Retail Activity in Cambridge and Somerville, MA.
- Vuchic, V. R. (2005). Urban Transit: Operations, Planning, and Economics, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, N.J.
- World Bank (2010). Urban Rail Development in China: Issues and Options, World Bank. 1.
- World Bank and DRC of China (2014). Urban China: Toward Efficient, Inclusive, and Sustainable Urbanization. Development Research Center of the State Council.
- Xavier, D., N. Douay and V. Gagnière (2012). "Évolution des schémas, permanence des tracés : la planification de la région parisienne au prisme des réseaux ferroviaires." Géocarrefour **Vol. 87**: p. 209-224.
- Yang, D.-H., R. Goerge and R. Mullner (2006). "Comparing GIS-Based Methods of Measuring Spatial Accessibility to Health Services." Journal of Medical Systems **30**(1): 23-32.
- Zhang, J., M. Zhao, H. Liu and X. Xu (2013). "Networked characteristics of the urban rail transit networks." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **392**(6): 1538-1546.
- 李军, 谢宗孝 and 等 (2002). "武汉市产业结构与城市用地及空间形态的变化." 武汉大学学报 : 工学版 **35**(5): 29-32.
- 顾永清 (1991). "武汉市多中心城市结构的形成及改造初探." 武汉城市建设学院学报 **8**(3): 9-15.
- 迟浩 and 郑凯文 (2013). "关于武汉轨道交通近期规划线路换乘方式评价." 铁道工程学报(5): 87-90.
- 黎晴, 刘子长 and 陈玫 (2014). 大巴黎 2050 战略规划中的交通理念. 城市交通发展模式转型与创新—中国城市交通规划 2011 年年会暨第 25 次学术研讨会, 中国湖北武汉.



黄辉 (2010). "大巴黎规划视角：低碳城市建设的启示." 城市观察(2): 29-35.

卞素萍 (2010). "巴黎城市空间形态解析." 南方建筑(1): 74-76.

曾刚 and 王琛 (2004). "巴黎地区的发展与规划." 国外城市规划(5): 44-49.

分类号 .....

U D C .....

密级 .....

编号 10486 .....

武汉大学

博士学位论文

基于结构中心度的城市地铁网络演变研究  
——以巴黎为例

研究生姓名：王 曦

指导教师姓名、职称：詹庆明 教授

学科、专业名称：城乡规划学

研究方向：数字城乡规划与管理

二〇一六年五月

**A Dissertation Submitted to Wuhan University  
for the Doctor's Degree in Engineering**



**Research based on Centrality Structrality on  
the development of metro network, case study  
in Paris**

**WANG Xi**

May 2016

# 论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已发表或撰写的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者（签名）：

年 月 日

# 武汉大学学位论文使用授权协议书

本学位论文作者愿意遵守武汉大学关于保存、使用学位论文的管理办法及规定，即：学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并提供文献检索与阅览服务；学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文；在以教学与科研服务为目的前提下，学校可以在校园网内公布部分或全部内容。

一、在本论文提交当年，同意在校园网内以及中国高等教育文献保障系统（CALIS）、高校学位论文系统提供查询及前十六页浏览服务。

二、在本论文提交当年/一年/两年/三年以后，同意在校园网内允许读者在线浏览并下载全文，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。（保密论文解密后遵守此规定）

论文作者（签名）： \_\_\_\_\_

学 号： \_\_\_\_\_

学 院： \_\_\_\_\_

日期： 年 月 日

## 本论文创新点

(1) 本论文将基于最简距离概念的结构中心度 (Structurality) 指数进行改良, 进而运用到对地铁站点的分析中, 并且在此基础之上提出了地铁网络的换乘效率值数 Eff, 提供了分析地铁网络的一种新方法。

(2) 本论文研究了巴黎地铁网络发展演变中的线路改动, 并且从中选取了四个典型案例, 通过中心度分析研究了这些线路改动对巴黎地铁网络结构的影响, 为其他城市的地铁网络的发展及规划提供借鉴。

(3) 本论文分析了巴黎地铁站点的结构中心度与进站交通量密度之间的关系, 研究结果显示两者之间存在着明显的相关性, 并且换乘站点周围存在明显的“水泵效应”。相关研究结果可为地铁网络规划的交通量预测新方法提供线索。

(4) 本论文研究分析了一些以巴黎地铁为原型的地铁模型, 并且通过分析比较发现了不同形态地铁模型的特征, 以及采用不同类型的地铁线路设计对地铁模型所产生的影响。

(5) 本论文分析了武汉市地铁网络现状及其 2017 年和 2020 年规划, 并且根据分析结果提出了武汉市地铁网络的发展方案, 并且分析比较了发展方案中的扩建线路对原有规划地铁网络将产生的影响。



# 目 录

摘要 .....	I
ABSTRACT.....	II
<b>1 绪论.....</b>	<b>1</b>
1.1 论文选题的背景 .....	1
1.2 论文的研究意义 .....	3
1.3 国内外相关研究现状 .....	5
1.4 论文研究的目的和具体问题 .....	8
1.5 论文研究的技术路线 .....	10
1.6 论文的内容和结构 .....	12
<b>2 网络中心度的概念及分析方法 .....</b>	<b>14</b>
2.1 复杂网络的理论基础 .....	14
2.2 中心度的概念 .....	15
2.2.1 中心度的定义及其重要性 .....	15
2.2.2 基于图论的网络中心度 .....	15
2.2.3 作为复杂网络的地铁网络及其中心度 .....	16
2.3 网络中心度分析方法 .....	17
2.3.1 度中心度(Degree).....	17
2.3.2 紧密中心度(Closness).....	17
2.3.3 介数中心度(Betweenness) .....	18
2.3.4 结构中心度 (Structuality) .....	18
2.3.5 结构中心度在地铁网络分析中的应用 .....	20
2.4 本章小结 .....	22
<b>3 巴黎地铁网络的历史演变及现状.....</b>	<b>23</b>
3.1 巴黎市的基本情况 .....	23
3.1.1 巴黎的城市概况 .....	23
3.1.2 城市交通体系概况 .....	24
3.2 巴黎的地铁网络及其演变发展 .....	25
3.2.1 1900 年之前的巴黎地铁规划 .....	26
3.2.2 1900 年至 1903 年：巴黎地铁建设之初 .....	29
3.2.3 1904 年至 1910 年：巴黎地铁的网络初步形成.....	31
3.2.4 1910 年至 1914 年：地铁网络的完善 .....	34
3.2.5 1914 年至 1929 年：第一次世界大战及其对巴黎地铁建设的影响.....	36
3.2.6 1930 年至 1939 年：地铁线路向巴黎郊区延伸.....	41
3.2.7 1939 年至 1949 年：第二次世界大战及其对巴黎地铁建设的影响.....	44
3.2.8 1949 年至 2000 年：RER 城际快轨的修建 .....	45
3.3 巴黎及其郊区地铁 2013 年现状 .....	49
3.4 研究数据收集及创建 GIS 数据库 .....	51
3.5 本章小结 .....	52
<b>4 对巴黎地铁网络演变的分析 .....</b>	<b>55</b>
4.1 巴黎地铁网络发展中的几次改动 .....	55
4.1.1 案例一（1910 年的 4 号线）：Chatelet 和 Raspail 地铁站的接合 .....	56
4.1.2 案例二（1931 年的 7 号与 10 号线）：7 号线的延伸以及对 10 号线轨道的整合 .....	57
4.1.3 案例三（1937 年的 8 号、10 号及 14 号线）：地铁线路间的转换.....	58
4.1.4 案例四（1942 年的 5 号与 6 号线）：5 号线的一段被归入 6 号线中 .....	60

4.2 案例一的中心度分析 .....	61
4.3 案例二的中心度分析 .....	64
4.4 案例三的中心度分析 .....	67
4.5 案例四的中心度分析 .....	70
4.6 本章小结 .....	73
<b>5 对巴黎地铁网络的现状分析 .....</b>	<b>75</b>
5.1 地铁网络形态的基本特征 .....	75
5.1.1 地铁站点的分布 .....	75
5.1.2 地铁线路与道路网络的关系 .....	77
5.1.3 地铁线路的特征 .....	78
5.2 对巴黎地铁网络现状的中心度分析 .....	80
5.2.1 巴黎地铁站的中心度分析 .....	80
5.3 巴黎地铁站的中心度与交通量的关系 .....	85
5.3.1 换乘站点及其周边非换乘站的中心度与交通量的关系 .....	86
5.3.2 单一地铁线路上站点的中心度与交通量的关系 .....	88
5.4 地铁系统的简化模型研究 .....	91
5.4.1 简化模型一的中心度分析 .....	93
5.4.2 简化模型二的中心度分析 .....	93
5.4.3 简化模型三的中心度分析 .....	94
5.4.4 简化模型四的中心度分析 .....	95
5.4.5 简化模型五的中心度分析 .....	96
5.5 巴黎地铁网络模型 .....	97
5.5.1 巴黎地铁网络模型一的中心度分析 .....	98
5.5.2 巴黎地铁网络模型二的中心度分析 .....	99
5.6 本章小结 .....	100
<b>6 对武汉地铁网络现状及规划的相关分析 .....</b>	<b>102</b>
6.1 武汉市的基本情况 .....	102
6.1.1 城市概况 .....	102
6.1.2 城市增长 .....	103
6.1.3 道路网络 .....	105
6.2 武汉市地铁网络现状及规划的基本特征分析 .....	105
6.2.1 地铁网络 2014 年现状分析 .....	106
6.2.2 地铁网络 2017 年规划分析 .....	107
6.2.3 地铁网络 2020 年规划分析 .....	110
6.3 对武汉地铁网络的中心度分析 .....	114
6.3.1 地铁网络 2014 年现状分析 .....	114
6.3.2 地铁网络 2017 年规划分析 .....	116
6.3.3 地铁网络 2020 年规划分析 .....	117
6.4 对武汉地铁网络的发展方案分析 .....	119
6.4.1 地铁发展方案分析（阶段一） .....	120
6.4.2 地铁发展方案分析（阶段二） .....	122
6.4.3 地铁发展方案分析（阶段三） .....	123
6.4.4 地铁发展方案分析（阶段四） .....	124
6.5 本章小结 .....	126
<b>7 结论与展望 .....</b>	<b>128</b>
7.1 反思研究目的及具体研究问题 .....	128
7.2 本研究主要结论小结 .....	129

7.3 本课题研究展望 .....	131
参考文献 .....	133
攻读博士学位期间参加的科研项目和论文发表情况 .....	140

# 摘要

在发展中国家推进城市化进程的今天，我们的地球正面临着全球变暖的挑战。为了面对这一挑战，一些发展中国家在过去的数年中已逐渐加强了发展公共交通的力度。例如，在 2012 年，中国的十六个城市共修建了 1755 公里的地铁线路。然而，根据国际经验来看，为了地铁的修建，政府常常承担着重大的经济风险。然而，中国的地铁建设仍然处于发展过热的状态之下。

本研究的主要目的在于利用结构中心度指数（简称中心度）来分析巴黎地铁网络的发展中的结构演变及其特征，并且尝试以武汉地铁为例，为其未来发展提出可能的规划发展方案。为了达到这一目标，我们首先研究了巴黎地铁的历史演变过程，及其地铁网络发展过程中的一些改动，并且选取了几次重要的线路改动作为案例，对其改动前与改动后的地铁网络做了中心度分析，分析比较了这些线路改动对整体地铁网络的影响。之后，我们对巴黎地铁网络现状进行了线路形态特征分析以及中心度分析，并比较了巴黎地铁站点的中心度与其入站交通量密度之间的关系。另外，我们还以巴黎地铁为原型，构建并分析了几个地铁模型，研究了不同地铁模型的特征及采用不同类型的地铁线路设计对地铁模型可能产生的影响。最后，基于对武汉地铁网络现状及其 2017 年和 2020 年地铁规划的中心度分析结果，我们提出了相应的发展方案，并对该方案进行了进一步的分析，研究了该方案中的地铁线路扩建与原规划相比将会对地铁网络产生的影响，从而为武汉地铁网络的未来发展提供参考建议。

结构中心度这一指标是基于达到目的地的“最简距离”而构建的，在道路网络中即为通过转最少次数的弯来到达目的地的距离。在地铁网络中，最简距离则意味着通过最少的换乘次数来到达目的站点。研究结果显示地铁站点的结构中心度与其入站交通量密度有明显的相关性，且换乘站点周围存在着明显的“水泵效应”。同时，地铁网络的换乘效率与换乘站点数成正比，且与总站点数和地铁线路条数成反比。通过对武汉市地铁网络发展方案的研究可知，规划师可采用结构中心度这一指数来分析和比较不同的地铁网络规划方案，从而为决策者提供相应的决策支持。

**关键词：**结构中心度、地铁、图论、巴黎

## ABSTRACT

In the era of rapid urbanization in the developing countries, our world is facing the challenge of global warming. In order to face with this problem, many developing countries have adopted the policy to reinforce the development of public transport. For example, in China in 2012, 1755 km long metro lines were constructed for sixteen cities. However, the metro construction implies financial risks according to international experiences. Even though, the metro development in China is overheating.

The main objective of the research is to study the structural characteristics of metro network in Paris and its evolution, and to apply the analysis for the metro network in Wuhan as a case study in order to give suggestions for its future development. In order to attain this objective, we have adopted the analysis of *centrality structrality* to study the metro networks in Paris as well as in Wuhan. The indicator *Centrality Structrality* (*Centrality* in short) is based on the simplest distance to reach the destination, which means a distance with the less turning to make in the road network. For the metro network, this means less changes of metro lines.

The analysis results show us that the centrality analysis can help to indicate the relative importance of the metro stations in a network. The indicator of centrality shows as well certain correlation with the entering traffic of stations. This could help to support the urban planners and designers to evaluate the possible importance of metro stations in terms of entering traffic. Eventually, this indicator could be applied to analyze and compare different planning of metro networks.

**Keywords:** centrality structrality, metro, graph theory, Paris

# 1 绪论

## 1.1 论文选题的背景

现如今，世界正面临着全球气候变暖以及环境污染的挑战，通过切实有效的政策方法进行城市建设的引导，从而实现可持续发展对全人类来说迫在眉睫。巴黎当地时间 2015 年 12 月 12 日，联合国气候变化框架公约近 200 个缔约国一致同意通过《巴黎协议》，要将全球平均气温升幅控制在工业化前水平以上低于 1.5 摄氏度之内。这是史上最多国家领导人参与的一次联合国气候峰会，也标志着可持续发展的迫切性已成为全人类的共识。

在城市化进程快速发展的今天，由于城市机动化及人们对出行舒适度及自主性的要求不断提高，发展中国家的现代城市机理多以私人小汽车为导向，逐步发展成大规模并且连接性薄弱的城市路网模式。以这种模式发展下去无疑会带来能源需求的爆炸性增长。为了面对这个挑战，在许多发展中国家都采取了鼓励发展公共交通的措施，试图为人们的出行提供更加绿色及环保的方式。过去几十年来，国内各大城市中的地铁网络建设及扩张正在如火如荼的进行着。早在 1969 年北京就开通运营其第一条地铁线路。2011 年，中国政府投资了 1940 亿来建设地铁系统，2000 年全国仅有 5 个城市拥有地铁，总长的 117 公里，2012 年则发展到了全国 16 个城市，总长 1755 公里（如表 1.1 所示）。另外，还有 20 个城市的地铁规划已经被批复或正在建设当中。2020 年，全国地铁网络总长度将达到 6000 公里 (World Bank and DRC of China 2014)。中国已经进入了一个地铁飞速发展的新时代。

表 1.1 运营中的中国城市地铁系统

地铁系统	北京地铁	天津地铁	香港地铁	上海地铁	广州地铁	长春地铁	大连地铁	武汉地铁	深圳地铁
城市	北京	天津	香港	上海	广州	长春	大连	武汉	深圳
开通时间	1971 年	1976 年	1979 年	1993 年	1997 年	2002 年	2003 年	2004 年	2004 年
运营线路	18 条	5 条	10 条	14 条	7 条	2 条	5 条	4 条	5 条
车站	334 个	90 个	86 个	337 个	130 个	49 个	44 个	102 个	131 个
公里	554	136	218	548	260	48.3	126.85	128.7	177.0



长度									
地铁系统	重庆地铁	南京地铁	沈阳地铁	成都地铁	佛山地铁	西安地铁	苏州地铁	昆明地铁	杭州地铁
城市	重庆	南京	沈阳	成都	佛山	西安	苏州	昆明	杭州
开通时间	2004年	2005年	2010年	2010年	2010年	2011年	2012年	2012年	2012年
运营线路	4条	6条	2条	3条	1条	2条	2条	3条	3条
车站	119个	121个	40个	70个	14个	40个	46个	33个	50个
公里长度	202.2	225.4	50	88	14.8	51.9	52.296	60.1	75.9
地铁系统	哈尔滨地铁	郑州地铁	长沙地铁	宁波地铁	无锡地铁	青岛地铁	南昌地铁		
城市	哈尔滨	郑州	长沙	宁波	无锡	青岛	南昌		
开通时间	2013年	2013年	2014年	2014年	2014年	2015年	2015年		
运营线路	1条	1条	1条	2条	2条	1条	1条		
车站	18个	22个	19个	42个	43个	10个	24个		
公里长度	30.4	26.34	22.26	49.2	55.75	12.0	28.7		

\*资料来源：维基百科词条“中国城市轨道交通系统”，2016年1月28日浏览访问。

中国的地铁发展有其特殊的优势。由于城镇化进程的加快，许多特大城市及大城市的人口不断增加，并且形成城市圈及城市群，而人们对出行的需求及质量要求都有所提高。同时，由于国家土地及节能减排等政策的引导，土地开发利用及城市发展都朝高密度集约化的方向发展，这就需要建设大容量快速轨道交通来对其进行

引导和约束。再加上全球金融危机之后，中央政府为了稳定经济和拉动内需所出台的一系列投资基础设施建设的举措，都为城市地铁发展提供了有利条件。

然而国际经验表明，地铁的建设有非常大的经济风险，而且地铁运营实际上很难实现盈利，有时甚至连建设成本都难以收回。建设地铁系统的造价高达每公里 5 亿人民币。一个 30 公里地铁网络的造价为 150 亿人民币，这相当于中国一个中等城市半年的财政收入。由于中国城市的尺度通常都非常大，因此地铁网络的尺度也基本上都会超过世界上一些其他城市的地铁尺度。上海地铁（总长 538 公里）及北京地铁（总长 465 公里）分别是继首尔地铁之后，世界第二和第三长的地铁网络。因此，中国地铁建设的经济成本也相对来说更大一些。

然而，尽管有种种风险，中国地铁发展依然呈现过热的趋势。一些地方政府不顾自身财政收入状况及交通需求情况，盲目要求建设地铁项目，以便跻身拥有地铁的城市行列之中；有的建设标准偏高，造成投资浪费，债务负担沉重等问题。在这样的情况下，就需要采取相应的措施来引导各个城市的地铁建设和发展，研究地铁网络设计方案的合理性，使政府的投资能够充分发挥其最大的社会经济环境效益，真正起到引导交通需求、减少拥堵、节能减排的作用，进而为中国城市的集约化、可持续发展服务。

## 1.2 论文的研究意义

世界银行在关于中国轨道交通发展的报告 (2010) 中指出，规划是地铁网络发展中首要步骤，也是最具影响力的环节。在这一阶段，许多将决定城市地铁发展的重要决策将在此阶段被做出。此时城市规划师及工程师则负责为决策者提供关于地铁选线、基础设施设计、交通用地整合以及交通量预测等各方面的建议。如表 1.2 所示，为中国项目开发的具体流程。城市轨道交通规划通常都是基于该城市的总体规划之上做出的。通常一旦做出具体的交通规划，并且对其工程技术以及经济方面的可行性研究被审批后，该项目则被认为是不可撤销的。

在中国轨道交通项目的审批流程中，可行性研究通常是论证已确定的规划方案，而并没有对相应的替代线路和发展方案进行充分的比较分析。地方政府为了能够达到拉动经济增长的目的，常常希望尽早实施建设项目，而对规划方案的考虑不够充分。因此，有些地铁网络的设计可能过于庞大，与现实交通需求和投资能力脱节，或者是从容易建设的角度考虑，选取已有建设用地的线路，而不是交通需求量最大的线路。例如，武汉市的地铁 1 号线就是沿着京汉铁路轨道的旧址来建设的。这样虽然能够节省建设成本，但却没有符合交通需求量更大的交通走廊。相对于该线路所服务区域的城市人口来说，其交通量是相对薄弱的。因此，在为了能够真正实现最符合社会经济环境效应、有利于城市可持续发展的规划方案，提出发展方案

分析，并且通过比较分析为决策者提供决策支持已成为了不可回避的一个重要部分。

表 1.2 中国项目开发流程

步骤	具体内容	审批单位	备注
1	城市总体规划	国务院、建设部	
2	城市交通总体规划	国务院、建设部	包括公共交通和城市轨道交通规划
3	城市轨道交通项目建议	国家发改委	类似于预可行研究
4	城市轨道交通可行性研究	国家发改委	技术、经济、工程可行性研究以及资金筹集方案（可行性研究一旦通过审批，该项目就被认为是实际不可撤销）。
5	初步设计	市专家组审批细节	
6	详细设计 → 建设规划	国家发改委审批规划	
7	准备投标文件	市政府	
8	采购实施	市政府	
9	确定运营商	市政府	

\* 资料来源：国发办（2003）81号文件《加强城市快速轨道交通建设管理的通知》

另外，对于交通量的预测也是地铁网络规划其中的一个难题。现在国际上主要的做法是依据高峰时间段公交乘客量的多少做出预测，或者是以某一城市轨道交通作为基准，通过经验指标进行比较从而做出评估。而国内城市轨道交通的预测主要采用的是基于“自下而上”的模型进行分析评估，而缺乏实际客流量等的事实验证。国际经验证明对城市地铁的预测通常是不符合实际的，一般情况下都有一种偏向乐观的倾向，这是由于客流量预测本身就是一个不确定因素很多的复杂过程，再加上常常有希望证明工程合理性的主观意愿存在。然而，对于交通量的分析和预测是十分重要的，因为这些预测信息不仅将会是规划设计的主要依据，同时更加影响决策者的判断。

国际经验证明成功的地铁网络不是偶然建成的。相反的，它们是在规划以及建设的过程中不断修改调整发展而成的。例如，巴黎地铁的第一条线路为1900年建成，在其100年的发展历程中，该地铁网络经历了多次的改建，包括不同地铁线路的合并，或者轨道的改道等等。这样的发展模式表明巴黎地铁的发展是以一种适应需求

的不断改良的过程而进行的。当今中国的地铁发展建设尚处于的初级阶段，因此相关的研究成果还比较有限。我们需要对相关的国际经验进行更加系统的学习和研究，以便从中总结其发展历程的经验和教训，让我们在大规模发展地铁网络建设的同时保持对可持续发展需求的警惕性。

### 1.3 国内外相关研究现状

在国内关于地铁网络的相关研究中，有许多研究分析都采用了复杂网络的理论来研究地铁网络的拓扑结构，例如通过一些复杂网络统计特征值，来研究地铁网络的特性。

例如丁益民等（2013）运用复杂网络理论，对我国北京、上海等多个城市的地铁网络进行了实证研究，分析了包括地铁网络的度分布、聚类系数和平均路径长度等指数。王海燕（2014）从轨道交通网络性能优化的角度考虑，对轨道交通网络结构进行了分析研究。对北京、上海、广州轨道交通网络进行了拓扑结构抽象，通过计算其统计特征，分析轨道交通网络的一些共性，得出了上述三个城市轨道交通网络具有小世界特性的性质。并且通过实例对轨道交通网络受到攻击后结构变化情况，验证轨道交通网络的一些无标度网络特性。

罗金龙（2014）根据网络的度分布、聚类系数、平均路径长度等复杂网络统计特征值。他还在已有的研究成果基础之上，提出了一种考虑介数、网络平均最短路径以及网络最大联通子图等因素的新方法，并将这种方法与其他方法做了网络上的对比试验。该方法不仅重视节点在网络中的控制能力，而且更侧重了网络中各节点之间的相互依赖关系，在整个网络拓扑层面上评估了网络中节点的重要性。

还有不少研究利用复杂网络理论来分析地铁网络的强健性，或者通过建模来模拟分析地铁网络受到攻击之后的可靠性等。例如张晋等（2013）对北京地铁网络拓扑结构的复杂性进行了建模研究。对 SpaceL 建模的研究显示，北京地铁网络具备小世界短距离、高容错性的特点，但少量枢纽站点的故障会对整体网络造成较大损失，需重点防护。张铁岩等（2012）利用复杂网络理论研究了国内地铁网络拓扑结构，结果显示国内地铁网络普遍具有较大平均最短距离，而地铁网络结构近似于随机网络。同时他们还对地铁网络的相继故障扩散过程进行了研究，发现该过程中蓄意攻击比随机攻击具有较快的传播速度。

张建华（2012）研究了城市轨道交通复杂网络（地铁复杂网络）的个性和共性。通过介绍全世界的城市轨道交通复杂网络，对其本身特征和普遍特征进行了研究。发现城市轨道交通复杂网络节点的平均度分布在区间【2, 2.45】上，任意两节点之间的平均最短路径长度大部分集中在区间【10, 16】之内，并且节点和边的平均介数与节点总数之间是线性增长关系。同时，他研究了城市轨道交通复杂网络对于攻击

的脆弱性，同时从拓扑脆弱性和功能脆弱性这两个方面来评估了系统的脆弱性。通过研究发现，城市轨道交通复杂网络对于最高介数节点攻击具有很大的脆弱性。

耿丹阳等（2015）计算了深圳市地铁网络现状、2020年和2030年规划，以及东京市地铁线网现状的网络特性指标，对比分析了地铁线网的网络特性。分析结果显示深圳地铁网目前处于中间发展阶段，即不成熟阶段；2020年至2030年的地铁网络规划中，地铁线网的强健性将不断提升，其他网络特性也将不断得到完善，但对比东京地铁网还有很大提升空间。

除了对地铁网络的拓扑结构特性研究之外，也有一些利用空间句法以及GIS分析方法，对地铁网络可达性的评估分析研究。例如，李向楠（2013）分析归纳了城市轨道交通吸引范围影响因素，并针对因素体系来做统计分析。在聚类结果的基础上，在每一类中选取代表性站点，讨论不同站点步行吸引范围。选取单线作为研究对象，引入可达性理论，从出行者的角度考虑，以广义出行时间为可达性描述，即以各种出行方式换乘城市轨道交通的广义费用最短为约束，建立轨道交通站点对不同接驳方式的吸引范围模型。

蒋伟和周卫军（2012）结合了空间句法的原理和GIS技术对长沙地铁规划线路的交通可达性进行了量化分析，通过可达性指标，指出长沙市城市远景轨道交通规划（2030）中所潜在的问题，并提出了相关建议，包括规划地铁线路应强调组团的作用，适当增加地铁各干线换乘点，建设环状地铁路网；通过加强组团间的联系，带动整体城市的发展，避免交通过于集中城市老中心等。而周群（2015）在传统方法的基础上提出一种改进的基于空间句法的地铁可达性研究方法，该方法通过使用改进的凸状分割方法，以每个地铁站点以及各个站点之间的线路作为研究的基本单元，选择GIS中的网络分析方法对基础数据进行处理。最后，通过对广佛地铁可达性进行实证验算，揭示了不同时期地铁站点可达性分布和演变情况。

程昌秀等（2007）结合乘坐北京市地铁更关心转换次数的特点，采用空间句中平均深度值的形态分析变量，对2008年北京市各地铁线路、各起始站、各换乘站的可达性做了数量化的评价。评价结果表明，空间句法是一种适于按线路单一票价计费的地铁评价方法，而与市内其他地铁线相比，8号、9号地铁线的可达性较差，使用率可能会较低，建议结合OD流调整班次或车长，以降低运行成本。

另外，还有的学者利用GIS技术开发了轨道交通规划平台。例如，郝立涛（2009）基于道路网规划模型，对交通规划联合模型进行了研究，建立了道路网与轨道网的联合网络以及道路网-轨道网交通分配的联合模型，实现了轨道网规划的功能。并且在交通规划的四阶段法的基础上，建立了交通数据模型及空间模型，同时根据国内交通规划的需求及特点，运用GIS技术，以自主开发的OpenGL图形平台作为轻量级的GIS系统，开发了集成化的综合交通规划软件系统Plan Horn。Plan Horn集成数据模型、算法模型、网络模型、实现了道路网规划、轨道网规划、公交

规划以及交叉口管理功能，并提供了 GIS 标准数据的交换接口。

还有研究通过数据统计分析的方法对城市的地铁系统进行规模和等级划分。曹小曙和林强（2008）基于地铁系统数据统计分析，对地铁建设的空间时序以及网络发育差异进行归纳，结合相关数据推导出地铁规模的匡算模型，并依据地铁系统的属性指标组和网络指标组对世界 121 个城市地铁系统样本进行聚类分析，将其划分为 3 个类别，并讨论城市人口规模和城市用地规模对地铁规模的影响，最后对中国 53 个城市进行地铁规模匡算和等级划分。结果显示，世界城市地铁建设在时空上存在波动性，地区间地铁系统的网络发育不均衡，欧洲和北美洲的地铁网络发育较为成熟，而包括中国在内的亚洲国家和一些南美洲国家的地铁网络则有较大的扩展潜力。

还有的研究旨在对地铁站点设计进行优化。例如杨震（2014）运用系统分析方法，分别从出行者、地铁公司、政府三个不同的角度对地铁站点布局进行分析。建立政府和地铁公司在有限候选站中选择设置地铁站点以追求总出行成本最小化、地铁运营成本最小化、地铁出行量最大化，出行者在各种出行方式下选择何种出行方式以追求广义出行成本最小化的双层规划模型，并设计启发式算法对模型优化求解。李成刚等（2015）以北京地铁西直门站换乘设施为研究对象，经过调查预测目标年地铁西直门站的交通量，并进行换乘设施服务能力和交通需求之间的匹配性研究，判断设施利用率，从换乘便利性等角度进行换乘效率分析与评价，最终实现了换乘设施的优化设计。

从以上国内的文献综述来看，基于复杂网络的地铁网络拓扑结构研究主要还集中在对地铁网络鲁棒性的研究方面，例如在地铁网络受到攻击之后，地铁系统是否稳定的问题上。另外还有部分研究致力于地铁网络可达性的分析。而对于地铁线路间的换乘分析以及地铁网络的优化研究相对来说还比较有限。

国外也有很多基于复杂网络理论的研究。例如 Derrible 和 Kennedy（2010）研究了世界上 33 个城市的地铁网络，他们将复杂网络理论方法运用到轨道交通研究当中，并且分析地铁网络的鲁棒性。所选取的这些地铁网络中包括路面轨道交通以及地下轨道交通。研究结果表明大部分的地铁网络是无标度网络和小世界网络，但随着地铁网络规格的扩大，其规律也越难以预测。该研究同时也提供了增加地铁网络鲁棒性的建议。例如，较小的地铁网络应该要建设更多中转站，并且通过环线来提供备选线路。对于大型的地铁网络来说，较少的站点数量可能会阻碍换乘，因此需要加设更多的换乘，特别是在城市中心外围区域。

Roth 等（2012）则以探索性的方式研究了世界上大部分地铁网络的结构演变发展。他们的研究表明，尽管这些地铁网络所处的城市的地理环境和经济背景有所不同，但是其地铁网络形态都有类似的特征。大部分的地铁网络都是一个环线型核心以及从核心延伸出的分支线路所构成的。分支线路的尺度大约为站点总数的平方根。分支线路上的站点数目大约是总站点数的一半，而环线型核心的平均直径大



约为平均分至线路的两倍。

还有一些研究关注的是地铁系统的利用率效率，例如 Shen 等（2014）研究了地铁利用率效率评估模型（UEEI）。该模型采用了多个不同的参数，包括城市人口（POP）、地铁系统的长度（LEN）、地铁系统的年客流量（RID）、地铁票价（FAR）以及 GDP 等。而 Zhao 等（2013）则利用 GIS 技术以及回归分析来建立客流量模型，分析了 55 个地铁系统的客流量情况。同时还利用了包括城市用地、地铁线路连接性、无缝换乘、地铁站环境等多个独立参数进行比较。研究结果发现，与地铁站客流量最为相关的几个因素包括：人口、办公区域、CBD、教育相关建筑、娱乐设施以及大型商业中心。其次，对其也有一定影响的因素包括：就业、道路长度、公交车道、自行车停放区域以及换乘设施等。

另外还有一些学者研究了地铁网络的影响。例如 Vuk（2005）根据交通流量、采访以及模型预测等方式研究了哥本哈根地铁对于通勤交通走廊的影响。研究显示大约有 70%到 72%的地铁乘客来自于公交乘客，而大约有 8%到 14%的客流量则来自于私人小汽车使用者。Castillo-Manzano 和 López-Valpuesta（2009）研究了西班牙中等城市中（Bilbao, Malaga 和 Seville）商户和地铁之间的短期和长期的积极或消极的相互影响。他们同时研究了附近的地铁站将从何种程度上影响商户的生意。研究表明一个有助于当地小资本经营的城市交通设施建设模式正在兴起。

## 1.4 论文研究的目的和具体问题

中国仍然处于地铁发展的初级阶段，因此相关的研究成果还比较有限。我们需要对相关的国际经验进行更加系统的学习和研究，以便从中总结其发展历程的经验和教训。然而，城市是一个复杂巨系统，一项地铁工程成功与否的因素当然也更不是由某一个变量能够决定的，它涉及到规划设计、工程技术、资金运营等各个方面的决策。本论文选取了对地铁网络设计的结构研究这一个视角出发，去学习和研究国际经验，以为中国的城市地铁发展提供思考的方向。

具体来说，此论文的研究目的在于利用结构中心度指数来分析巴黎地铁网络的发展中的结构演变及其特征，并且尝试以武汉地铁为例，为其未来发展提出可能的规划发展方案。

为了实现这一总体研究目的，其研究子目标如下所示：

- 1) 研究巴黎地铁的历史演变过程，及其网络发展过程中的一些改动；
- 2) 选取几次重要的线路改动作为案例，并且对其改动前与改动后的网络做中心度分析，并进行比较分析，总结这些改动对地铁网络的整体影响；
- 3) 对巴黎地铁网络现状进行线路形态和中心度分析；
- 4) 分析巴黎地铁现状网络中地铁站点的中心度及其与交通量之间的关系；

- 5) 构建并分析简单的地铁模型，并且以巴黎地铁为原型构建并分析巴黎地铁模型的结构特征。
- 6) 对武汉地铁网络现状及地铁规划进行中心度分析；
- 7) 对武汉市地铁网络的规划提供发展方案，并对这些方案进行分析，为武汉地铁网络的未来发展提供参考建议。

为了能够实现以上的研究子目标，对每个子目标所提出的研究问题如下：

- 研究目标一：研究巴黎地铁的历史演变过程，及其网络发展过程中的一些改动。
  - 问题 1：巴黎地铁网络发展可分为哪几个阶段？
  - 问题 2：巴黎地铁建设之前主要有哪些规划方案？
  - 问题 3：最初修建的地铁线路有哪些？
  - 问题 4：两次世界大战对巴黎地铁的建设有怎样的影响？
  - 问题 5：巴黎地铁网络向郊区的扩建是什么时候开始的？
  
- 研究目标二：选取几次重要的线路改动作为案例，并且对其改动前与改动后的网络做中心度分析，并进行比较分析，总结这些改动对地铁网络的整体影响。
  - 问题 1：选择历史上哪几个重要的线路改动做为研究案例？
  - 问题 2：所选择的案例中，地铁网络发生了什么样的变化？变化的主要原因是什么？
  - 问题 3：在改动之前，地铁网络中站点的中心度如何分布？
  - 问题 4：在改动发生之后，地铁网络中站点中心度发生了怎样的变化？
  - 问题 5：地铁网络发生改动之后换乘效率是有所提高还是降低？
  
- 研究目标三：对巴黎地铁网络现状进行线路形态和中心度分析。
  - 问题 1：巴黎地铁站的分布是怎样的？
  - 问题 2：巴黎地铁线路的形态特征是怎样的？
  - 问题 3：巴黎地铁线路与道路网络的关系如何？
  - 问题 4：地铁网络中站点的中心度分布如何？
  - 问题 5：若考虑地铁与 RER 站点的换乘，地铁站的中心度指数又如何？
  - 问题 6：巴黎地铁网络现状的换乘效率为多少？
  
- 研究目标四：分析巴黎地铁现状网络中地铁站点的中心度及其与交通量之间的关系。
  - 问题 1：巴黎地铁现状网络中各站点的进站交通量分布如何？
  - 问题 2：地铁站点的平均进站交通量如何？

- 问题 3: 从地铁站点的中心度指数分布和平均进站交通量的分布中是否可以找到相关性?
  - 问题 4: 从单一的线路上的中心度指数分布和平均进站交通量分布上又可以观察到什么规律?
- 研究目标五: 构建并分析简单的地铁模型, 并且以巴黎地铁为原型构建并分析巴黎地铁模型的结构特征。
    - 问题 1: 根据不同的线路类型可以构建哪些简单的地铁模型?
    - 问题 2: 这些简单地铁模型中的地铁站点的中心度分布如何?
    - 问题 3: 这些简单地铁模型的换乘效率如何?
    - 问题 4: 以巴黎为原型, 可以构建哪些巴黎地铁模型?
    - 问题 5: 这些巴黎地铁模型中的地铁站点的中心度分布如何?
    - 问题 6: 这些巴黎地铁模型的换乘效率如何?
- 研究目标六: 对武汉地铁网络现状及地铁规划进行中心度分析;
    - 问题 1: 武汉的地铁网络现状和几次近期规划的是怎样的?
    - 问题 2: 武汉地铁网络(现状及规划)的形态特征是怎样的?
    - 问题 3: 武汉地铁网络(现状及规划)的中心度表现如何?
    - 问题 4: 武汉地铁网络的换乘效率指数在建设发展中将发生怎样的变化?
- 研究目标七: 对武汉地铁网络的规划提供发展方案, 并对这些方案进行分析, 为武汉地铁网络的未来发展提供参考意见。
    - 问题 1: 针对武汉地铁网络的近期规划能够提出哪些发展方案?
    - 问题 2: 这些发展方案对于原来的规划方案有哪些中心度上的改变?
    - 问题 3: 对于武汉地铁未来的发展, 可以提出哪些参考建议?

## 1.5 论文研究的技术路线

根据本研究的具体问题, 论文的研究路线如图 1.1 所示。在第一部分是对巴黎地铁的案例进行研究。首先, 我们将选取巴黎历史演变中比较重要的几次线路的改动作为案例进行分析, 并且对改动之前和改动之后的地铁网络做中心度分析。并分析比较线路改动对整体地铁网络的影响。之后, 我们将对巴黎的现状网络进行分析。其中主要包括对站点分布及线路形态特征的分析, 以及对地铁站点的中心度分析, 并且将地铁站点的中心度指数与其进站交通量密度进行比较, 研究其相关性。之后, 再构建简单的地铁模型, 并且以巴黎为原型构建巴黎地铁模型, 并且对这些模型进

行中心度分析。

在第二部分中，主要是在对巴黎地铁进行分析之后进行的一个在武汉地铁网络的一个应用型分析。首先将对武汉地铁网络的现状及规划中的线路形态进行分析，之后再对其进行中心度分析，并为武汉市地铁提出发展方案分析，对其今后的发展提出参考建议。

本文的创新点包括以下几个方面：

- (1) 对结构中心度 (Structurality) 的分析方法的创新。
- (2) 研究了结构中心度与交通量密度之间的关系。
- (3) 巴黎地铁网络发展演变中的线路改动案例研究。

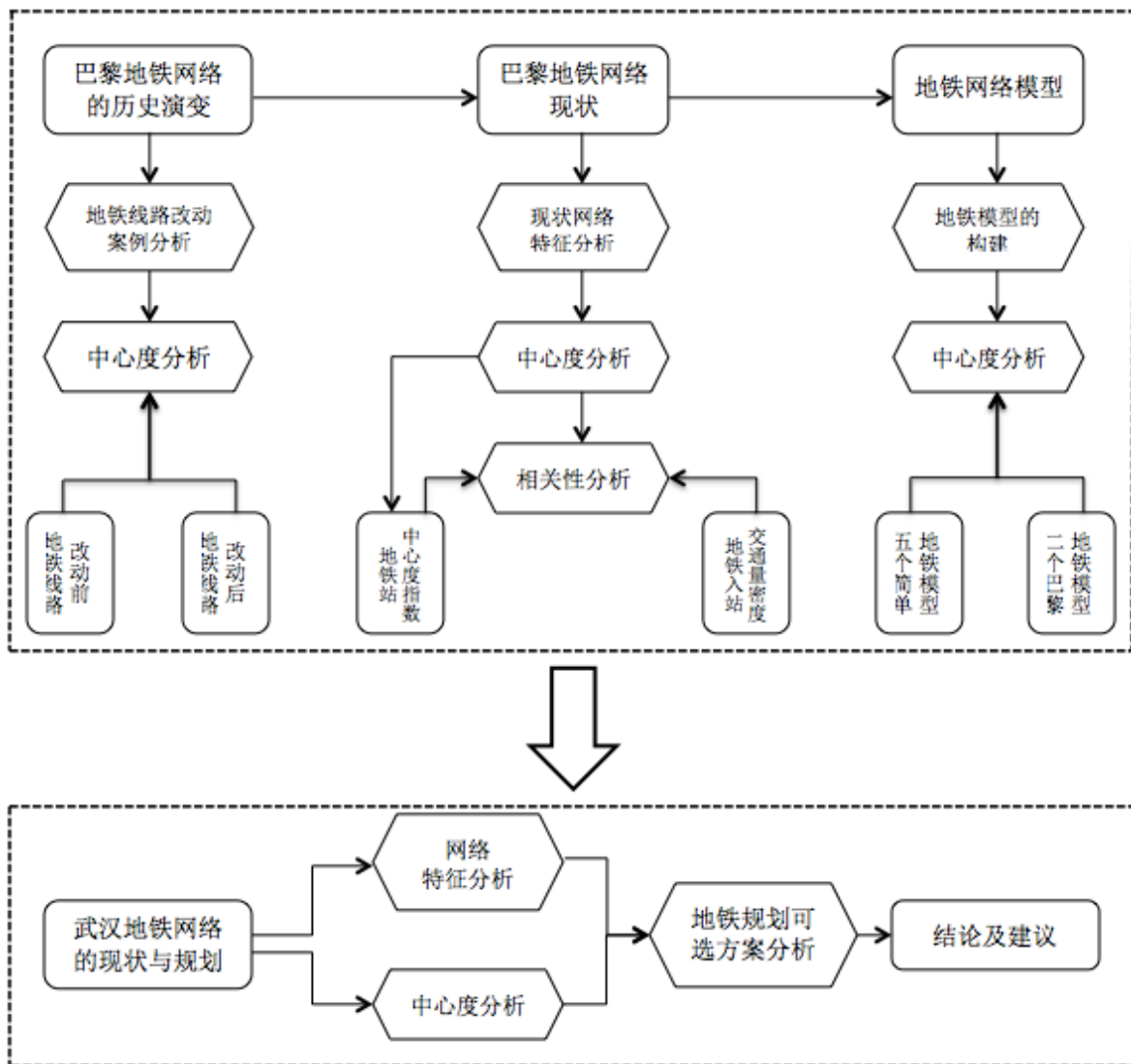


图 1.1 研究路线

## 1.6 论文的内容和结构



图 1.2 文章结构大纲

如图 1.2 所示，为本论文的内容和结构大纲。根据研究目的以及研究问题等，论文的结构安排主要分为七章内容。论文第二章首先将回顾地铁网络国内外的相关研究现状，然后对于本论文中所采用的结构中心度分析指数的概念以及研究法方进行进一步的阐述，从而建立相关的理论基础。在之后的第三章中，首先将对巴黎市

的城市概况、其城市规划与发展、人口分布以及交通系统做一个分析概括，然后将巴黎地铁网络的演变发展分为八个阶段，并且对于每个阶段，将结合当时的社会经济背景，对地铁线路的规划建设以及线路网络的改动做出系统性的分析。本章最后将对巴黎地铁网络的进行现状分析，同时介绍数据库的创建以及数据来源等。

在第四章中，将针对上一章所回顾的巴黎地铁网络发展历程中的改动进行进一步的分析，选出比较具有代表性的四个案例进行中心度分析，并且对于改动发生前及改动发生后，整个地铁网络所发生的变化进行比较和分析。在之后的第五章中，首先将分析巴黎地铁现状网络的基本特征。随后分别针对两种情况的地铁现状做出了中心度分析，即仅考虑巴黎地铁网络的情况，以及考虑地铁与远程快轨（RER）换乘情况。并且进一步比较了地铁站的中心度与其交通量之间的相关关系。在本章最后，还分别对五个简单的地铁模型以及以巴黎地铁为原型的两个巴黎地铁模型进行了中心度分析及讨论。在第六章中，主要是试图针对武汉市的地铁现状及规划进行一定的分析，包括其地铁网络的基本特征分析、地铁站服务半径分析以及中心度分析等，并且根据一系列的分析结果，对武汉市地铁规划提供一些发展方案。并且对这些方案进行了相关的分析和讨论。最后，在第七章中，将对本论文的研究结果进行总体性的概况，并针对不同的研究分目标及研究问题进行反思和讨论，并且对相关的课题研究提出将来可能的研究方向。

## 2 网络中心度的概念及分析方法

### 2.1 复杂网络的理论基础

作为系统科学的一个分支，复杂网络是最近二十多年才兴起的一门学科。复杂性是指“系统不可逆性、不可预报性以及状态涌现、结构可突变特性的统称。”复杂性是混沌性的局部与整体之间的非线性形式，由于局部和整体之间的非线性关系，是的我们不能通过局部来认识整体。而我们所研究的地铁网络就是典型的复杂性系统。

最早关于复杂网络的研究主要包括以下几种网络：规则网络、随机网络、小世界网络和无标度网络。规则网络是非常具有规则的拓扑结构网络，它的生成规则完全是人给定的，如环状、栅格、树形网络、完全耦合网络和树形耦合网络等等。随机网络（又称随即图），是指通过随机过程制造出的复杂网络，最有代表性的随机网络是 ER 随机图，其生成规则为：首先在平面上生成  $N$  个孤立的节点，任意两个节点之间都以相同的概率  $p$  连接，由此就可以生成具有  $pN(N-1)/2$  条边的 ER 随机图。然而，最经典的复杂网络模型还是小世界网络和无尺度网络。

最早观察到的小世界现象是社会人际网络。二十世纪 60 年代，美国哈佛大学社会心理学家斯坦利-米尔哥伦（Stanley Milgram）做了一个连锁信实验。他将一些信件交给自愿的参加者，要求他们通过熟人转发到知名的收信人手中。从最后的研究结果可推测出，地球上任意两个人之间的平均距离是 6，即只要通过 5 个人，就可以与地球上任何一个角落的任何一个人发生联系，即著名的六度分离（six degrees of separation）推断。在之后进行的一系列实验也证明了，在现实世界里的一些网络，尽管节点数量庞大，但从一点出发，其实只需要经过仅仅几步转折，就能到达任意一个节点，该类网络被称为小世界网络。

小世界网络是介于随机网络与规则网络之间的。对于纯粹的规则网络，当其中连接数量接近饱和时，集聚系数很高，平均路径长度也是分短；而纯粹的随机网络（如 ER 随机网络模型）有着很小的平均路径长度，但同时集聚系数也很小。而小世界网络却有很小的平均路径长度，但却也有着比随机网络高出相当多的集聚系数，这中特性被称为现实网络的小世界特性。

无尺度网络是另一类带有特性的复杂网络，其典型特征是在网络中的大部分节点只和很少节点连接，而有极少的节点与非常多的节点连接。这种关键的节点（称为“枢纽”）的存在使得无尺度网络对意外故障有很强大的承受能力，但面对协同性攻击时则显得脆弱。最有代表性的无尺度网络模型是 BA 模型，该模型基于两个假设：增长模式和优先连接模式，即无尺度网络是不断扩大不断增长的，新的节点在加入时会倾向于与有更多链接的节点相连。

Albert 等（2000）研究比较了 ER 随机网络模型与 BA 模型在移除少量节点时



网络连通性的影响。假设在一个网络中移除一个节点，以及与其相关的连接，那么原网络中的其他点也可能受到影响：原本相连的两个节点可能不再相连；即使相连，从其中移除到另一处可能需要经过更远的距离。总的来说，会降低网络的联通性，而这种影响主要通过最大连通子图的大小  $S$  与平均路径长度来衡量。在执行“随机攻击策略”，也就是在网络中随机地去除一些节点时，无尺度网络的  $S$  比随机网络下降慢得多， $L$  的增长也缓慢得多。但在执行“蓄意攻击策略”，也就是选择移除连接度最高的节点时，则会得到相反的结果，只需要移除 5% - 10% 的高于 5 度的节点，就能彻底瘫痪无尺度网络。

## 2.2 中心度的概念

### 2.2.1 中心度的定义及其重要性

根据 Christaller (1975) 的定义，中心度代表了一个城市能够从城市之外将货物及各种服务提供给城市居民的能力。Castelles (1972) 则指出中心度代表了一个城市整合经济、政治、行政及各种社会活动的功能，它代表了整个城市的结构性控制能力。此定义的侧重点在于强调城市的不同功能的结构性整合。此概念可以用于解释像北京这样，有经济、政治、行政、军事、医疗、文化和教育等多种功能整合的中心城市。

Choay (1988) 的定义则是偏向一个地理信息系统的概念，他指出中心度取决于从某些点吸引及分散人群的效率。这些点可以是城市中心，也可以是一些城市设施（如商业、文化、金融中心等）。此概念更有助于研究现代城市。在一个城市中，市民的出行是由道路网络和公共交通网络来实现的，因此研究网络中心度是十分重要的。

### 2.2.2 基于图论的网络中心度

为了研究不同复杂网络的结构共性，研究学者们通过图（graph）来作为描述这些网络的工具。任何一个网络都是节点由不同方式连接在一起而形成的一个系统。图论（Graph theory）是数学的一个分支，它是研究顶点和边组成的图形的数学理论和方法。它最早起源于著名的柯尼斯堡七桥问题。该问题由莱昂哈德欧拉于 1735 年提出：在欧拉时代的东普鲁士柯尼斯堡市区跨普列戈利亚河两岸，河中心有两个小岛通过七条桥相连接，怎样才能在所有桥都只走一遍的前提下那个，将所有的桥都走遍+他把实际的抽象问题简化为平面上的点与线组合，将每一座桥视为一条线，桥所连接的地区视为点，并将问题的实质归于一笔画问题，即判断一个图是否能够遍历完所有的边而没有重复。之后不少数学家都尝试解析类似事例，因为最终发展出

了图论。

而网络中心度这个概念最早于 50 年代出现在社会科学当中，用于评估一个人在社交网络中的重要性 (Newman 2010)。在图论及网络分析当中，一个结点 (Vertex)代表了它在一个网络中的相对重要性。之后，此概念被用于分析空间布局，例如一个房间在一座建筑当中的重要性，或者一段道路在一个道路网中使用的频率等。

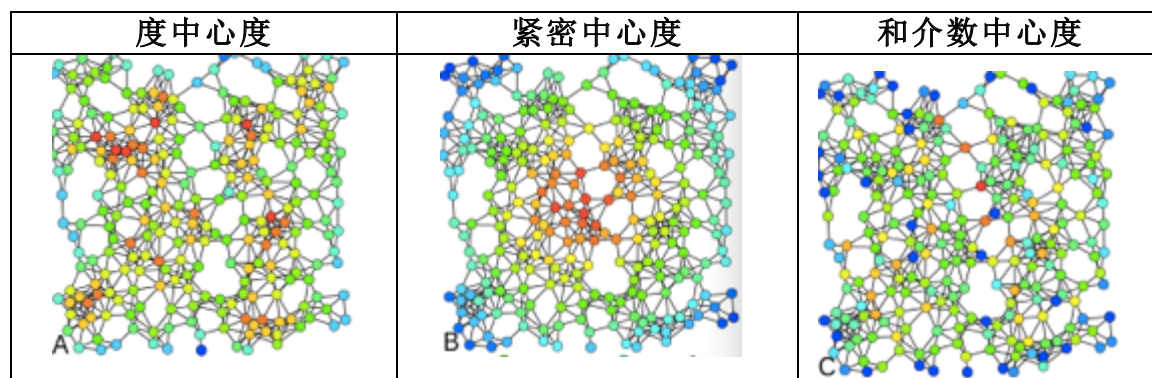


图 2.1 各网络中心度指标的示例

红色的结点拥有最高的中心度，来源：<http://en.wikipedia.org/wiki/Centrality>

三个传统的中心度测量指标是度中心度 (Degree), 紧密中心度 (Closeness) 和介数中心度 (Betweenness)。度中心度 (Degree) 是最简单的一个，被定义为一个结点与其它结点的连接数。紧密中心度 (Closeness) 是从网络中的一个结点出发到其它任意一点的平均距离。和介数中心度 (Betweenness) 则考虑的是两个结点之间的最短距离将经过某一个结点的次数。这些量测指标的示例如图 2.1 中所示。在后面一小节的中心度分析方法中，我们会做进一步的研究。

### 2.2.3 作为复杂网络的地铁网络及其中心度

图论在公共交通网络中的应用之后出现在 80 到 90 年代。中心度主要应用于研究交通网络的鲁棒性。近期的地铁系统的相关研究中也有运用到介数中心度 (Betweenness) 来研究其鲁棒性。Derrible (2012) 研究了世界范围内多个不同尺度的地铁网络的介数中心度的演变，他的研究发现当地铁网络的尺度变大时，介数中心度的指数也会更均匀的分布在网络中。Zhang 等 (2013) 也利用介数中心度对城市网络的拓扑特征进行了一定的分析。他们发现当地铁站点数量增加时，其介数中心度也会增加，而城市轨道交通网络的度中心度的平均值介于 2 和 2.45 之间。地铁系统是一个非常好的复杂网络的实例。通过对地铁站点进行中心度分析，可以做出乘客的交通流量分布图，它可以有助于分析一个新的地铁线路的交通流量，以便于地铁网络的设计更好的与交通需求保持一致。毕竟，公共交通的目的不仅在于将乘客从起始点运送到目的地，而且同时也要能够尽量减少出行的时间及换乘的次数。

## 2.3 网络中心度分析方法

### 2.3.1 度中心度(Degree)

历史上首先出现的是度中心度的概念，它被定义为一个结点上的连接数（该结点与其它结点的连接数）。这个中心度概念也可以被理解为一个结点捕捉到从网络中通过的任何东西的风险度（如病毒或某些信息）。在一个有向网络中（即连接具有方向性），我们通常分别用两种参数来测量度中心度，即 *Indegree* 和 *Outdegree*。分别来说，*Indegree* 是指向结点的连接数，而 *Outdegree* 是从该界点出发而指向其他结点的连接数。在社交网络中，涉及当友谊和合作的案例，*Indegree* 通常被解释为受欢迎的程度，而 *Outdegree* 则是合群的程度。

在一个给定的，拥有 $|V|$ 个顶点以及 $|E|$ 个边的网络 $G := (V, E)$ 中，顶点  $v$  的度中心度被定义为 $C_D(v) = deg(v)$ 。

### 2.3.2 紧密中心度(Closness)

在一个相互连接的网络中，每一对结点之间都有一个测量距离，此距离被定义为它们之间的最短距离。一个结点  $v$  的远度被定义为它到网络中任何一个其它的结点的距离之和 (Bavelas 1950)，而紧密中心度则与远度的概念相互补。因此，一个结点越是处在中心，它到其他结点的总距离就越低。紧密中心度可以被理解为从结点  $v$  向网络中其它所有结点连续地传送信息所需消耗的时间 (Newman 2005)。

在经典的紧密中心度定义中，信息的传播是采用最短路径去模拟的。这个模型或许不能针对所有的交流情景都实现真实化模拟。然而，如随机行走中心度这样相关的定义 (Noh 和 Rieger 2004)，进一步讨论了测量紧密中心度的方法。这种测量方法是紧密中心度的一种随机行走的版本：它测量了一个随机行走的信息在网络中抵达任意一个位置的速度。由 Tran 和 Kwon 提出的等级中心度 (Hierarchical closeness) 是为了解决有向网络的缺陷而发展出的紧密中心度的延伸概念 (2014)。等级中心度明确包括了选定结点可对其它结点产生影响的范围信息。

Stephenson 和 Zelen 的信息中心度 (Information centrality) 又是另外一种紧密中心度测量方法，它与 Noh 和 Rieger 的随机行走概念有一定的相似度。从根本上来说，它意味着朝向一个顶点  $v$  的阻力距离的调和平均值，此测量值要相对来说更小一些，如果顶点  $v$  是通过很多小的阻力距离连接其它的几何顶点的 (Stephenson 1989)。

在紧密中心度的传统定义之下，一个不连接的网络的中心度值将为 0。Dangalchev (2006) 在其对网络漏洞性的研究中，为了便于将其应用于缺少连接度的网络之中，紧密中心度被定义如下：

$$C_c(v) = \sum_{t \in V \setminus v} 2^{-d_G(v,t)}$$

### 2.3.3 介数中心度(Betweenness)

介数中心度是测量网络中某个结点的相对中心度的指标。它等于从网络中任意一点出发到任意其它一点的最短路径中经过该结点的次数。一个有着高介数中心度的结点意味着它对整个网络的传输有着重大的影响，并且基于假设传输过程是通过最短路径来实现的。此概念有着非常广泛的应用，包括在计算机领域、社会网络、生物、交通等方面的应用。介数中心度的发展基本上归功于社会学家 Linton Freeman。在他的定义中，那些拥有最大可能性出现在一对随机的顶点的随机最短路径中的结点，拥有最高的介数中心度 (Freeman 1977)。

在一个给定的，拥有  $V$  个顶点的网络  $G := (V, E)$  中，顶点  $v$  的介数中心度的计算方法如下所示：

1. 对于每一对顶点  $(s, t)$ ，计算其间的最短路径。
2. 对于每一对顶点  $(s, t)$ ，计算它们之间的最短路径经过顶点  $v$  的次数。
3. 计算出以上所有顶点对  $(s, t)$  之间的最短路径经过顶点  $v$  的次数总和。

介数中心度计算方法的数学公式如下所示：

$$b_i = \frac{\sum_{s < t} g_i^{(st)} / n_{st}}{(1/2)n(n-1)}$$

公式中  $g_i^{(st)}$  是结点  $s$  与结点  $t$  之间经过顶点  $i$  的测量距离， $n_{st}$  是从结点  $s$  到结点  $t$  之间的测量距离的总数。

### 2.3.4 结构中心度 (Structuality)

在日常生活中，我们发现从点 A 到点 B，人们常常倾向于选择更简单的路径而不是几何距离最短的路径。Bonnin (2013) 指出当人们行走在一个道路网络之中，通常会选择减少需要转弯的次数。例如，当一位居民为问路者指路时，他通常会指出最简单的路径，也就是要转弯次数最少的路径，即使那并不是几何距离最短的路径。

结构中心度 (Structuality) 是基于最简单路径的，即包含最少的转弯次数。此测量指标最早由 Courtat (2011) 提出并运用于计算道路网络的中心度，并与传统的紧密中心度 (Closeness) 等进行比较。结构中心度 (Structuality) 对城市路网的分析中，通常可以明显区别出城市主干道和古老的城墙，因此为观察路网提供了一个等级分明的结构性视角。



图 2.2 威尼斯道路网络及水路网络的结构中心度(Structurality)分析 (©Perna)

例如, Perna (2011) 利用此测量值分析了威尼斯的陆路及水路网络。图 2.2 为道路网络的中心度 (左), 水路网络中心度 (中) 及两个网络整合在一起的中心度 (右)。值得说明的是如果仅仅在道路网络本身之中寻找中心度测量值的逻辑是很难的 (左图), 但如果研究水路网络本身 (中图) 或者陆路水路两个网络整合之后的中心度 (右图), 就会发现更容易理解其网络结构。这个结果表明威尼斯的城市网络结构是基于陆路水路网络相结合的, 而其水路网络也具有道路网络的功能。

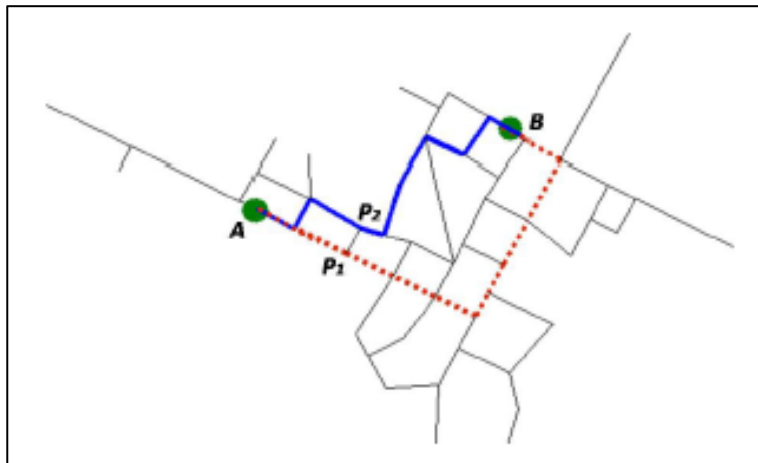


图 2.3 城市道路网络中的两点 A 和 B 之间的距离

蓝色实线为最短距离 ; 红色虚线为最简距离 ( (Courtat 2012)

人们在出行过程中, 从点 A 到点 B 常常采用的是最简路径而非最短路径。为了模拟这一行为模式, 我们定义  $d_{C,p}^i(A,B)$  为城市中从一点出发到另外一点沿路径 p 的距离。结构中心度的定义则是两点之间的最“简单距离”:  $\min_{p \text{ path from A to B}} d_{C,p}^i(A,B)$  (如图 2.3)。此分析方法测量的是转弯的次数或者说为了从某处出发到另外一处转换道路的次数。在此定义中, 此种方法显得更有创新性但同时也显得没有那么直观。每一条路 (不仅仅是一个路段) 的值取 1 (在同一条路径上则取值为 0), 并将它与代表从出发点到终点过程中需要转弯 (或变化道路) 的次数的系数一同进行计算。计算结构中心度的数学计算公式如下所示:

$$C^s(x) = \frac{\mu_G(G)}{\int_G d^{sim}(x,g)d\mu_G}$$

结构中心度通过基于简单距离的计算能够很好的揭示出整个网络的全局中心度，更多的考虑到其整体而不是局部的细节，并考虑到所有的点与其它所有点之间的关系。从这上来说，此方法所考虑的并不直观，然而其分析结果却是关键而不可或缺的 (Laurent Beauguitte (coord.) 2013)。

此方法的一个不足在于，当我们要研究的问题不涉及到整个网络的时候，而是涉及到网络中的细节的时候，可能就需要采取另外一种方法。例如，当研究者关心的是沿着一条相同的道路行进的问题，在结构中心度的考量中，同一条道路上的所有点都是等同的，因为它们任何一点出发去别处需要转弯的次数都是相同的。在这样的情况下，我们既不能研究它们之间的相互关系又不能将它们进行区别。从这个角度上来说，结构中心度是相对来说比较简略的。但这个方法可以很好的运用于对地铁网络的，因为乘坐地铁需要考虑的首要问题还是换乘的次数，以及路径的选择等等。

### 2.3.5 结构中心度在地铁网络分析中的应用

对于地铁网络来说，这个“拓扑结构”的概念是十分重要的。一般来说，对于一个步行者，不论其年龄或者体态，其步行可达范围决定了他日常活动的区域。如果更远就需要借助于公共交通了。以巴黎地铁来说，我们需要回溯到地铁建立之初来理解乘客的出行逻辑。当地铁线路出现之后，只要步行者可以到达地铁站，对于他们来说就不需要消耗更多的体力了，利用地铁他们以同样的花费到达地铁网络上任意远的一个站点（如果车厢里有座位将更加强化此逻辑）。当新的地铁线路建成，线路与线路之间相交之后，乘客通过地铁可达的区域自然扩大，并且随之而来的出现了一个新的考量，即线路间的换乘。相比而言，这比待在座位上不需要担心坐过站的出行来说，显然要更为复杂一些，更别提换乘过程中线路与线路，站台与站台之间的步行所花费的时间和经历。这一心理考量，对于游客来说更加明显。通常他们需要紧张地计算换乘之前所剩的站点数量，以便做好准备，当遇到巴黎市中心 Châtelet 站这样的大换乘站时，还需要为找寻换乘线路而苦恼。从这个实例我们可以看出，地铁网络的首要特征是它的拓扑结构，这比它的其他特征更为重要，例如站点数量等等。

地铁站点  $M_0$  的中心度， $C(M_0)$ ，计算为由此站点出发到地铁网络中任何一个其它站点  $M$  的换乘次数  $Ordre(M/M_0)$ 。若我们将相对于出发站点到其他所有站点的拓扑距离进行求和，并除以站点总数就可以得到从该站点  $M_0$  出发到其他所有站点的平均换乘次数  $D$ ：

$$D(M_0) = (1/N) \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$



当一个地铁站的平均换乘次数越少时，它的“中心度”就越高，因此我们将中心度定义为该距离的倒数：

$$C(M_0) = 1/D(M_0) = N / \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

如果我们计算所有站点的平均换乘次数的平均值  $D(M_0)$ ，即可得到在该地铁网络中，从任意一站点到其他任意一站点的平均换乘次数  $D_m$ ：

$$D_m = (1/N) \sum_{Stations M_0} C(M_0) = (1/N^2) \sum_{Stations M_0} \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

一个地铁网络的平均换乘次数越小，该地铁网络的换乘效率越高。为了方便比较和结果的展示，我们将该换乘效率值得公式修正为系数值 **Eff** 越大，地铁网络效率越高：

$$Eff = 1/D_m = N / \sum_{Stations M_0} D(M_0) = N^2 / \sum_{Stations M_0} \sum_{Stations M} Ordre(M/M_0)$$

在对系数值标准化的过程中，我们通过除以地铁总数来求平均值，并且没有除去参考线路（拓扑距离为 0）上的地铁站数量。这样一来计算结果中平均换乘具体可能小于 1，而整体换乘效率值 **Eff** 可能大于 1。

如上所述，共有两种情况（如图 2.3 所示）。第一种情况是地铁线路上的非换乘站点，它们拥有相同的中心度，此时其换乘次数为这条地铁线与其他之间的距离。第二种情况为换乘站点，其换乘次数为换乘站点上经过的这些地铁线之间的距离。我们可以看到不同的地铁线路的中心度或许有高有低，但是换乘站却总是更加重要的，因为它们累积了它们所在的每条线路的中心度。

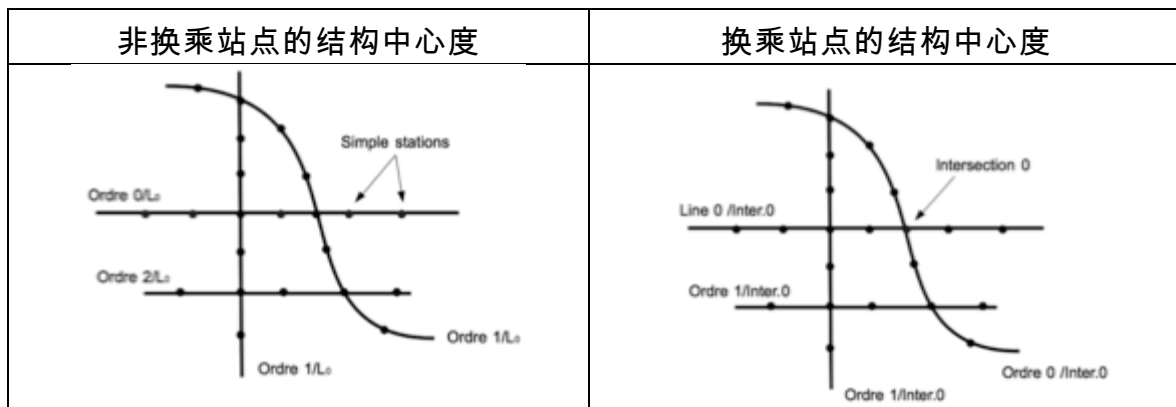


图 2.3 两种结构中心度的计算

理解一个地铁网络的中心度的演变是非常重要的。通过了解地铁站的中心度，地铁站的设计能够更好的服务相应的交通流量。另外，它可以成为估量一个新的地铁线路交通量的工具。归根结底，公共交通的目的不仅仅在于将乘客从出发点运送到目的地，同时也要考虑到减少换乘次数以及出行时间。在此研究中，GIS 的软件例如 ArcGIS 的网络分析模块将被用于分析地铁站的服务半径，最终的研究结果将被用于进行规划以及决策支持。



## 2.4 本章小结

本章主要对中心度的概念以及网络中心度的分析方法分别做了综述性的阐释。

本章开始，我们回顾了复杂网络的理论基础，探讨了中心度的几个传统定义，以及基于图论的网络中心度的几个经典指标，包括度中心度 (Degree)、紧密中心度 (Closeness)和介数中心度 (Betweenness)。之后我们继续讨论了做为复杂网络的地铁网络的中心度研究现状，并介绍了新的中心度分析指标——结构中心度 (Structuality)的概念以及应用实例。

在之后的部分，我们针对几个传统的中心度指标的分析方法以及结构中心度的分析方法进行了探讨，分别介绍了其原理以及具体的计算方法。结构中心度 (Structuality)是基于最简距离而定义的。例如，在道路网络中，最简距离是指通过最少的转弯次数来到达目的地，而结构中心度即是测量从网络中某一点到达任意一点的最简距离的平均值的指标，中心度越高代表最简距离的平均值约短。除此之外，我们还对结构中心度在地铁网络分析中的应用方法进行了介绍。由于在乘坐地铁出行的过程中，乘客常常考虑的是选择一个少换乘的简单路径，因此我们将采用结构中心度 (Structuality)来进行地铁站点的中心度的分析。

## 3 巴黎地铁网络的历史演变及现状

### 3.1 巴黎市的基本情况

#### 3.1.1 巴黎的城市概况

巴黎市是法国的首都和最大城市，也是法国的政治文化中心。它隶属于法兰西岛大区，也是大区的核心。巴黎处于法国北部巴黎盆地的中央，市区位于塞纳河沿岸，河上的西堤岛与圣路易岛是巴黎最古老的地区。巴黎市辖区的范围仅仅算在巴黎城墙，即环城路之内，并未包括巴黎市扩张到旧城墙之外的城市范围。大巴黎地区还包括分布在巴黎城墙周围的上塞纳省（Hauts-de-Seine）、瓦勒德马恩省（Val-de-Marne）和塞纳圣但尼省（Seine-Saint-Denis）。大巴黎地区的人口逾 670 万，面积达到 762 平方公里。



图 3.1 巴黎的行政区划图 ( © Wikipedia )

如图 3.1，巴黎市辖区内按照历史划分为 20 个区，面积为 86.928 平方公里，人口超过 220 万。巴黎在将近 1000 年的时间中是西方世界最大的城市，目前是世界上最重要的政治与文化中心之一，许多国际组织都将总部设立在此。在 2012 年 3 月英国智库的全球金融中心指数中，巴黎名列世界第 22 位，也是名列欧洲第 7 位。巴黎商会是欧洲第一大商会，巴黎也是法国多数国际大企业的总部所在地。财富世界 500 强的企业中，有 33 家将总部设在巴黎都会区，是欧洲最集中的地区。

巴黎自中世纪以来的发展中，一直保留了过去印记，甚至是那些历史最悠久的街道布局。当代巴黎的大部分城市面貌是 19 世纪中叶奥斯曼男爵对巴黎进行大规模城市改造的成果。奥斯曼巴黎改造计划的核心是干道网的规划与建设，当时巴黎的交通已经近乎瘫痪，奥斯曼在旧城中心征收土地，拆除建筑，如切蛋糕一般开辟出条条宽敞的大道，这些大道贯穿各个街区中心，成为了巴黎交通的主要交通干道。同时，其都市计划还沿着林荫大道两侧，确定街道的宽度，严格规范了修建建筑物的高度和形

式，强调了街景水平线的连续性，造就了典雅气派的城市景观。

### 3.1.2 城市交通体系概况

表 3.1 巴黎及其郊区的公共交通模式 (STIF 2011)

交通模式	运营商	线路数	站点数	轨道公里数	服务区域
地铁	RATP	16	303	217	巴黎及近郊
区域快轨	RATP	2	65	117	巴黎及郊区
RER	SNCF	5	443	1408	巴黎及郊区
远郊铁路 Transilien	SNCF	8			
轻轨	RATP	3	38	34	巴黎及郊区
	SNCF	1	11	8	郊区
公交	RATP	316	1274	2816	巴黎及郊区
	Optile	1078	24500	20133	远郊

巴黎地区的公共交通体系非常发达，拥有多种不同模式的交通网络。如表 3.1 所示，巴黎市区及其近郊主要有地铁站密集的地铁网络分布，而巴黎郊区乃至法兰西岛则有区域快轨 RER 以及远郊铁路 Transilien 做为补充，巴黎地区还有非常发达的公共汽车线路以及几条轻轨线路来服务于地区性的通勤，以及对地铁网络的补充和衔接。巴黎市地区的公共交通的主要运营商有巴黎大众运输公司（RATP）负责巴黎及其近郊的交通模式（地铁、公交以及区域快轨 RER A 线和 B 线的一部分）；法国国家铁路（SNCF）负责远郊铁路 Transilien 以及区域快轨 RER C 线、D 线、E 线以及 A 线和 B 线的一部分；另外，法兰西岛运输专业组织（Optile）主要负责远郊乃至整个法兰西岛的公共交通线路的开发和运营。

巴黎着力于发展公共交通、鼓励自行车等慢性交通系统的建设。为了步行的通畅，城市街道两旁无大型停车场，且设置了自行车和行人专用道。巴黎提供 Vélib 公共自行车租赁服务，在 1450 个自行车站提供超过 20000 辆自行车供市民及游客使用。巴黎是法国的铁路中心，目前有 6 个铁路车站，分别提供法国普铁、高铁以及远郊铁路等服务。巴黎同时也是法国最重要的高速公路网络中心，三条环状高速公路围绕在巴黎四周。环城大道建于 1970 年初期，也是巴黎市区（约 200 万居民）和郊区（超过 1200 万居民）之间的分界线，也是巴黎的行政边界，全长 35 公里（如图 3.2）。另外巴黎还拥有两个国际机场，一是奥利机场，另一个是法国最大的戴高乐机场，距巴黎市中心约 25 公里 (卞素萍 2010)。

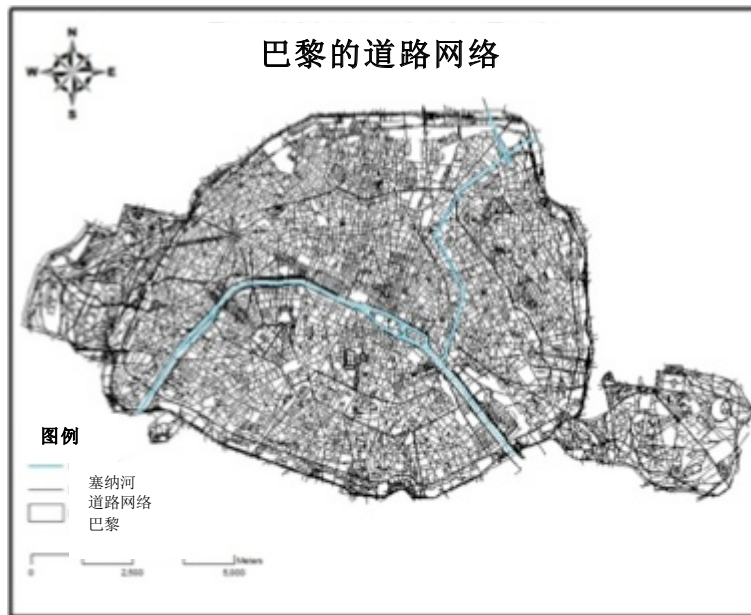


图 3.2 巴黎的道路网络 ( 数据来源 IGN , ©王曦 )

### 3.2 巴黎的地铁网络及其演变发展

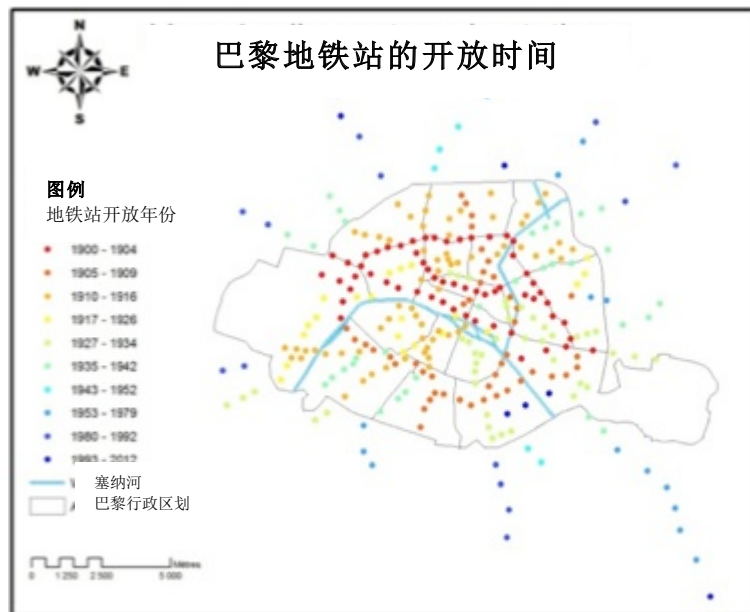


图 3.3 巴黎地铁站的开放时间 ( 数据来源 RATP Open Data , ©王曦 )

如图 3.3 所示，为巴黎地铁站开放运营的时间。最早开放的地铁站用红色表示，而最晚开放的则用蓝色表示。从图上可以看出，最早开放的部分地铁站主要是构成地铁网络框架的环线以及横穿巴黎中心的地铁 1 号线。之后，地铁站点在巴黎市内不断加密，最后以已有线路延长线的形式延伸到巴黎周围的郊区。巴黎北部地铁站点的加密过程比南部普遍要快一些。市域内最新建的地铁站是 14 号线上的三个地铁站，填补了地铁网络在东南边靠城市外围的空缺。从整体上看，巴黎地铁网络的发展逻辑遵循

的是由框架到细部，由内而外逐步扩张的一个过程。

为了进一步了解巴黎地铁的演变过程，我们将巴黎地铁发展的近百年历史划分为八个阶段，即地铁建设之初的各种规划方案，地铁网络初步形成、到逐步完善，两次世界大战对地铁建设的影响，地铁线路向郊区的延伸以及 RER 城际快轨的修建。进而对各条线路的选线、修建难度，以及社会经济背景下的考量做出了相应的分析。

### 3.2.1 1900 年之前的巴黎地铁规划

从 1845 年起，就有两个关于巴黎地铁系统的规划方案被政府提出。中央政府以及主要的铁路公司建议建设一个能够连接巴黎主要火车站的地铁网络，从而能够便于郊区的火车进入城市当中。而巴黎的地方政府则希望建设一个主要旨在满足城市内部交通需求的市级地铁网络。在 1856 年至 1890 年之间，十多个规划方案被陆续提出，然而没有一个被最终采纳。在此期间，伦敦于 1863 年开放运行了它的第一条地铁线；纽约也于 1867 开始了地铁系统的服务。

#### 1) 1875 年的 Heuzé 规划

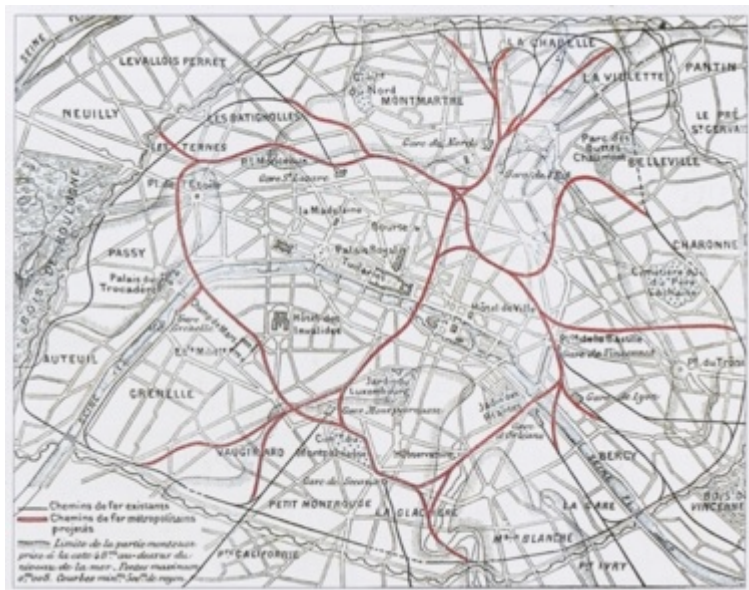


图 3.4 1875 年的 Heuzé 规划 (©AMTUIR)

巴黎建筑师 Loui Heuzé 提出了一个将地铁线路建在 7 米高的高架之上的规划。该规划的宗旨就在于避免伦敦的地铁模式。Heuzé 写道：在这个地铁系统中，我们可以将地铁线路延伸到各个方向，通过有些许弯曲的路径避开那些新的街区，那些纪念性建筑物，穿过那些需要较少工程量的区域，利用现有的火车轨道，例如北站（Gare du Nord）、东站（Gare de l'Est）以及 Montparnasse 站，同时服务到那些市场和邮局，在其上建立其高架的地铁站台。同样，我们可以以相同的方式在高架桥上穿过塞纳河。从图 3.4 中，我们可以看到 Heuzé 的规划连接了巴黎几个大的火车站，但他所倡导的高架轨道的说法并没有被采用，考虑到蒸汽机动力驱动所发出的巨大噪音，及浓浓的黑



烟可能会对周边建筑表面带来的污染，他的规划方案很快就被否决了。

## 2) 1881 年的 Paul Haag 规划

而建筑规划师 Haag 很好的理解了巴黎地铁的规划方案需要同时考虑到巴黎市的利益以及区域性的利益（如图 3.5 所示）。于是他根据这个理念设计出了既能够将大型铁路网络连接起来，并且又能够服务首都的各个街区的地铁网络。这些地铁网络穿过巴黎并且连接了巴黎的重要的火车站，如：Saint-Lazare、Gare du Nord、Gare de l'Est、Gare de Lyon 以及 Gare d'Austerlitz。不过这个设计方案最终还是没有被巴黎市政府所采纳，反而是日后在柏林以及布鲁塞尔的地铁网络中看到了此规划的影子。例如，布鲁塞尔的 Nord-Midi (0 号线)，它就是两个火车站 Gare du Nord 和 Gare du Midi 之间的一个连接地铁线，它延伸了穿过整个比利时的火车线路并且没有在其首都被隔断，因此在国家以及国际尺度上都发挥着重要的作用。

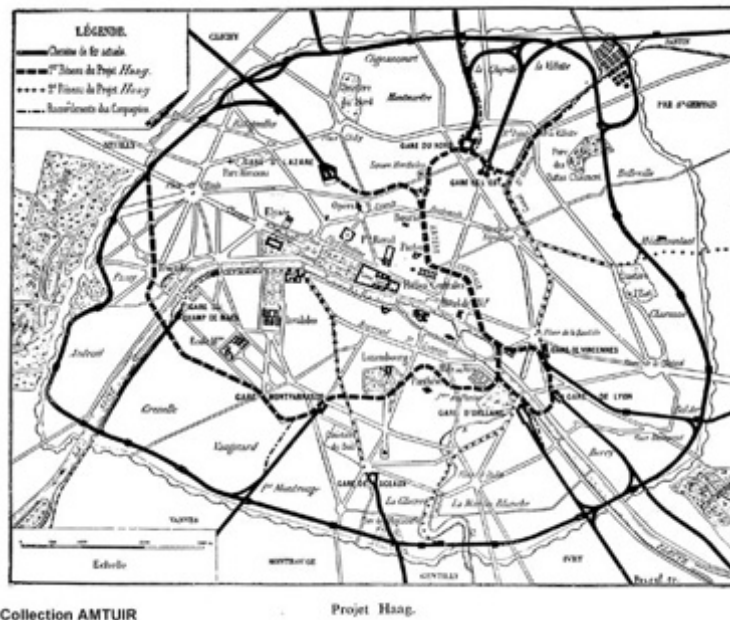


图 3.5 1881 年的 Paul Haag 规划 (©AMTUIR)

## 3) 1891 年的 Eiffel 规划

1891 年的 Eiffel 规划则旨在服务巴黎市内的交通，它并没有连接巴黎市内的重要火车站。不过，它同时也没有很好的沿着市内交通流的走向，也没有能够很均衡的将站点分布在整个巴黎市区内。尽管如此，我们还是能够在此看到有一些线路的段落的轨迹在三十年之后也被建设出来了（如图 3.6 所示）。

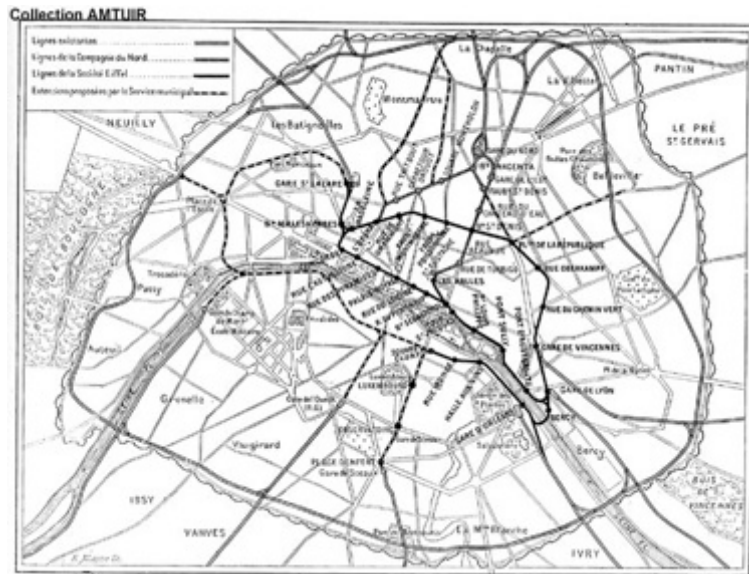


图 3.6 1891 年的 Eiffel 规划 ( ©AMTUIR )

最终，为了不错过将在 1900 年在巴黎举办的时间博览会，1895 年 11 月 22 日巴黎市政府的提案被最终批准了。政府决定将要建设一个不超出巴黎市旧城门，主要为城市内部而不是为区域服务的地铁网络。1896 年，巴黎市政府开始正式实施地铁规划，此规划旨在“为巴黎地区公共交通不足地区提供服务，并加强首都人口密度相对较低的地区。”这个最初方案包括四条形成环路，以或平行或垂直于塞纳河的方向连接不同区域的的地铁网络（如图 3.7）。这个规划方案成为了今天 16 条地铁线路及 303 个地铁站的巴黎地铁系统的基础。



图 3.7 巴黎所采用的最初的地铁网络规划 ( 1896 ) ( ©AMTUIR )



### 3.2.2 1900 年至 1903 年：巴黎地铁建设之初

根据 1898 年 3 月 30 日颁布的法令，巴黎市政府开始了巴黎地铁的第一条线路的建设，该线路将在 Porte Maillot 到 Porte de Vincennes 之间运行。与此同时，市政府也同时开始了另外两条重要的线路的修建。一个是未来的 2 号线北线上的 Porte Dauphine 和 Etoile 之间的部分以及未来的 2 号线南线上的 Etoile 和 Trocadero 之间的部分。而这些建设中的线路将会构成如今的巴黎地铁网络的基础框架。它们分别是：

- 1 号线：从 Porte de Vincennes 站到 Porte Maillot 站；
- 2 号线北站：从 Porte Dauphine 站到 Nation 站；
- 2 号线南站：从 Nation 站到 Etoile 站；
- 3 号线：从 Villiers 站到 Gambetta 站。

巴黎地铁 1 号线，本来预计耗时十四个月，在 1899 年 2 月份开始施工，但它的启动仪式推迟了三个月，在 1900 年 7 月 19 日才建成，仅有 8 个站点开放运营。因此本计划为 1900 年的世界博览会服务的目标并没有实现。但在十七个月内建造 11 公里的地铁网络在当时可以说是破了纪录。值得一提的是，这也是由于地铁隧道并不是十分深，因此只需要沿着路面的道路轨迹采用“明挖回填”的施工方式有关（如图 3.8）。



图 3.8 巴黎地铁建设初期采用的明挖回填的施工方式 ( ©Wikipedia )

从 1 号线刚开始投入运营时，规划师们就确认了这项规划是成功的，也证明了巴黎人需要有地铁。1 号线运营的频率从运营初期高峰期的 6 分钟一班次在几个月内增加到了 3 分钟一班次。1900 年 12 月，乘客的数量为 4 百万，平均每天有 130000 乘客乘坐地铁。

地铁建设施工之前，对于各种规划方案进行了整整三十年的讨论。然而这期间所遗留的不确定性似乎并没有消失。至于地铁 1 号线，直至施工建设过程中，仍然存在

着对于其线路轨迹方案的不断修改。相对于其连接 Porte de Vincennes 和 Porte Dauphine 的初始方案而言，它最终转向连接地铁站 Etoile（如图 3.9）。当时的规划师评估，如果该条线路能由 Etoile 站继续延伸至服务 Porte Maillot 附近的区域将能够发挥更大的作用，并且也将更能够盈利。这主要是由于巴黎十六区在当时还是一个正在建设的区域，居住人口密度很低，而且也被认为是非常远离市中心的。因此地铁 1 号线最终修建至了地铁 Etoile 站，并且今后保持笔直向西的方向延伸。最后地铁 2 号线则连接了 Porte Dauphine 站和 Etoile 站，而巴黎十六区发展至今，也成为了巴黎最富裕的区域，拥有昂贵的房地产，众多的外国使馆，还设有一些大型体育场馆，这样看来当时的考量也算多虑了。



图 3.9 1900 年的巴黎地铁 1 号线 ( ©AMTUIR )

巴黎地铁 1 号线最终的线路自巴黎东边的 Porte de Vincennes 巴黎环城铁路站附近始发，然后穿过民族广场，沿着 Diderot 大道和 Lyon 路，在穿过巴士底广场，延伸至 Faubourg-Saint-Antoine 和 Rivoli 路，进而穿过协和广场和香榭丽舍大街、戴高乐广场，延伸至 Grande Armée 大街直到 Porte Maillot，也是巴黎换乘铁路站附近的地方为止。巴黎环城铁路是一条环绕巴黎一周的老铁路线，修建在元帅大道（Boulevards des Maréchaux）的内侧，如今已经被废弃了。

同时期修建的 Etoile 站到 Trocadro 站以及 Etoile 站到 Dauphine 站的线路也分别在 1900 年的 10 月 2 日和 12 月 13 日投入运营。同时期也开始了 2 号线北线的修建（如图 3.10）。在 2 号线北线的路段上包含了一段将近 2km 的高架线路，从火车北站和东站的火车轨道上方经过。该线路西部 Etoile 站到 Anvers 站之间的部分于 1902 年 10 月 7 日开放运营，Anvers 站到 Bagnole 站（今天的 Alexandre Dumas 站）之间的线路于 1903 年 1 月 31 日开放，而最终 1903 年 4 月 2 日，整条线路延伸到了 Nation 站，完成了巴黎地铁网络中北环线的成功修建。



图 3.10 1903 年的巴黎地铁中的北环线地铁 2 号线开通运营 (©AMTUIR)

然而在 1903 年 8 月 10 日，在该条线路上的 Couronnes 站由于线路短路而引起的车辆起火导致了 84 人死亡的事件也引起了人们的震惊。当时的车厢内部都是木质结构，此次事故后当时的巴黎都会地铁公司（Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris，简称 CMP）也对地铁车厢的建造材料进行了改善，自 1904 年起地铁列车的电路设备都采用了金属材料进行封闭管理，而到了 1908 年所有的地铁列车也采用了全金属材料修建。

### 3.2.3 1904 年至 1910 年：巴黎地铁的网络初步形成

在 1904 年到 1910 年之间，巴黎地铁的修建加速进行，巴黎成为了修建新的地铁线路的大工地。1903 年 11 月 5 日，2 号线南线的 Trocadéro-Passy 部分也如期开放运营，而其向 Nation 站的延伸也在具体施工当中。然而，巴黎市政府认为 Place d'Italie 站和 Nation 站之间的交通流量并不大，因此最终决定将 2 号线南线延伸至火车站 Gare du Nord，2 号线南线的方向由 Italie 站转向了巴黎北部。

3 号线（Villiers 站至 Gambetta 站）于 1904 年 10 月 19 日延伸直至 Père-Lachaise 站，并于隔年 1 月延伸至 Gambetta 站。为了呼应交通需求显著的地段，这条线穿过了那些有用大商场以及交易市场的街区。3 号线成为了巴黎地铁中又一条东西向的直径穿越型线路。它同时也是自 Couronnes 站的火灾事故后第一条采用全新配置的线路。

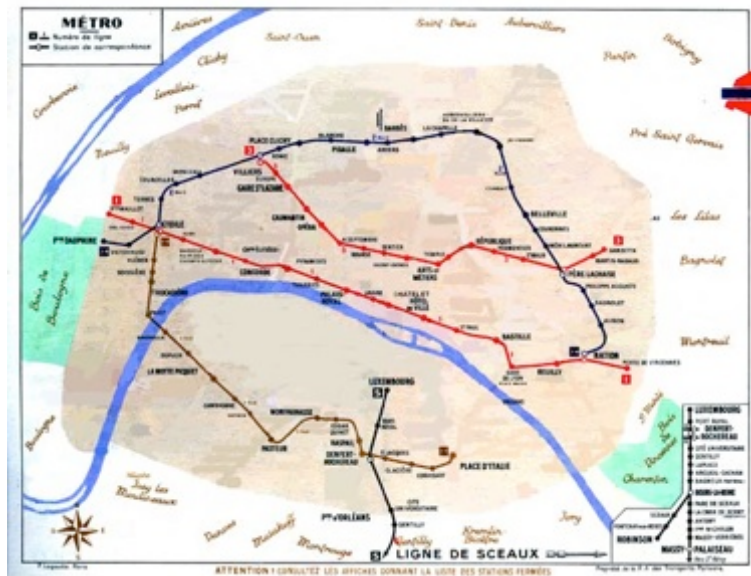


图 3.11 1906 年的巴黎地铁网络 (©AMTUIR)

2 号线南线的延伸施工自 1903 年就启动了，在 1906 年 4 月 24 日，Passy 站与 Place d'Italie 站之间的路段也开通运营（如图 3.11）。这段新开通的线路中既包括了路面上的部分又包括路面之下的部分。在临时的终点站 Place d'Italie 修建有大的环形双向轨道：在这个环形轨道之中，将有一部分延伸至火车站 Gare du Nord，另一部将成为未来的 6 号线延伸至 Nation 站。

5 号线的建设，之前预计连接火车站 Gare de l'Est 与 Pont d'Austerlitz，也开始了施工。但很快的，巴黎市政府就决定将其延伸至 Place d'Italie 站，连接 2 号线南线，并且将整体线路变换成 5 号线。因此，2 号线北线也正式成为了今天的 2 号线。

5 号线的施工在巴黎地铁网络的建设中有其独特性，特别是横跨塞纳河连接 Gare d'Austerlitz 站和 Place Mazas 站（如今的 Quai de la rapée 站）。遗憾的是，该条线路并没有服务火车站 Gare de Lyon，这在今后成为了这条线路上的一个永久的缺憾。Italie 站到 Gare d'Austerlitz 路段于 1906 年 6 月 2 日开通运营，接下来 Gare d'Austerlitz 站到 Place Mazas 站于同年 7 月 13 日开通。在之后的几个月中，5 号线上的列车停止于 Place d'Italie 站，通过附加修建的线路来服务到达 Gare de Lyon 的乘客。如图 3.12 所示，这段特别的线路持续运营到了 1906 年 9 月 17 日，5 号线自 Place d'Italie 站修建了新的线路到 Lancry 站（现在的 Jacques Bonsergent 站）。2 号线南线以及 5 号线在 1907 年 10 月 14 日合并，并从 Lancry 站延伸至火车站 Gare du Nord，并于同年开通运营。



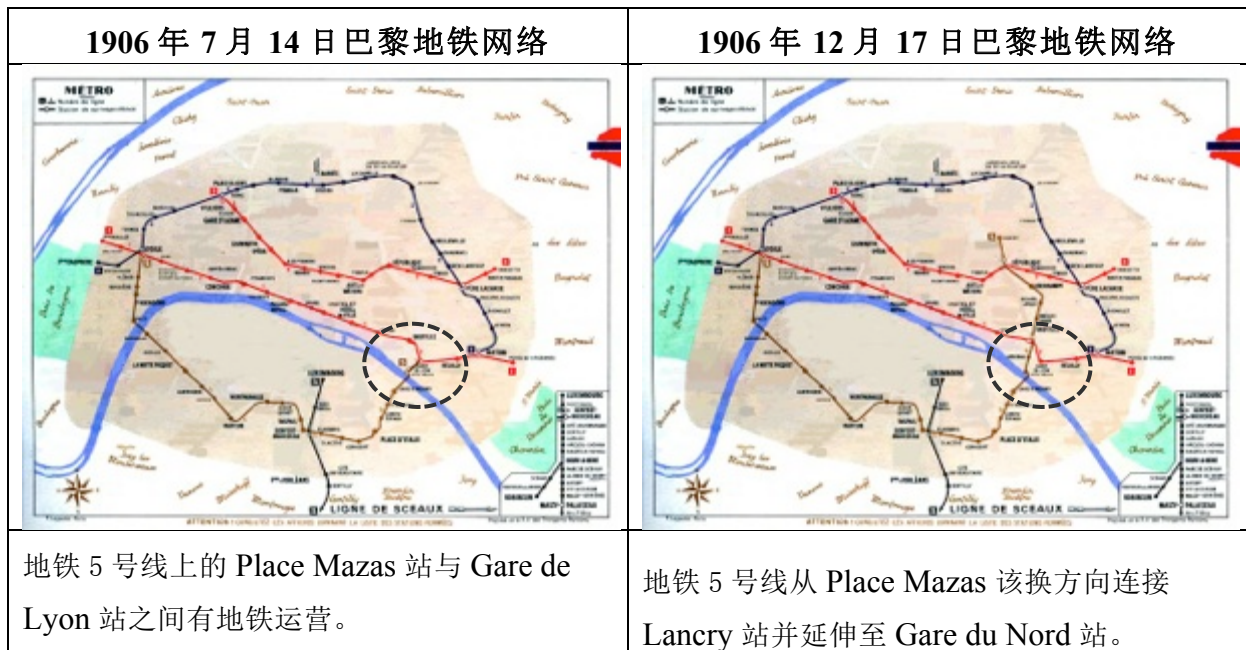


图 3.12 地铁 5 号线的方向改变 (©AMTUIR)

巴黎地铁的网络在地铁 6 号短线开通后可以算是初具雏形了。这条 6 号线于 1909 年连结了 5 号线上的 Place d'Italie 站和 Nation 站。之后 4 号线自 Porte d'Orléans 站在 1908 年的 4 月到 1910 年的 1 月间陆续开放运营至 Porte de Clignancourt 站。这条线路是历史上第一条从地下经过西提岛，并穿过塞纳河的地铁线路 (如图 3.13 所示)。

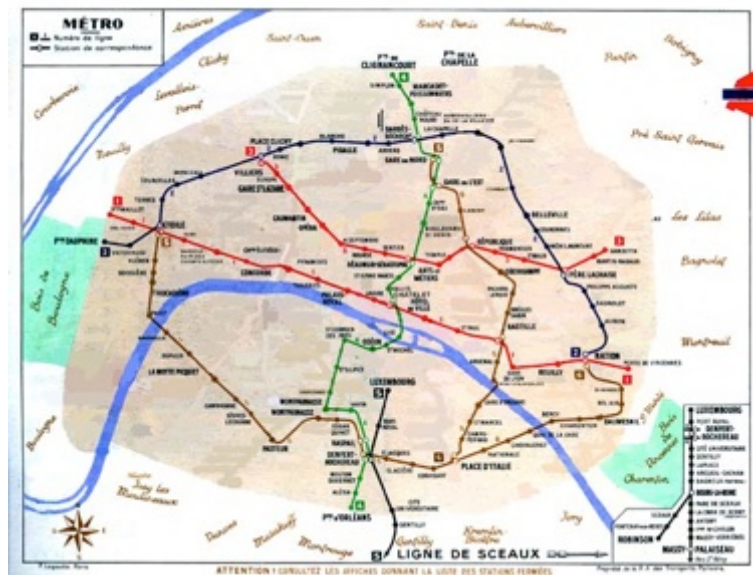


图 3.13 1910 年的巴黎地铁网络初步形成 (©AMTUIR)

### 3.2.4 1910 年至 1914 年：地铁网络的完善

到 1910 年，纪录在 1898 年的地铁建设项目进程表中的巴黎地铁网络雏形已经建设完成了。巴黎市政府以及当时的巴黎都会地铁公司（CMP），也就是如今的巴黎大众运输公司（RATP）也开始了 1898 年备案的附加地铁网络的修建。同时，十个地铁线路扩建项目以及新线路建设也被予以批准，因此施工也很快的展开了。

Jean-Baptiste Berlier，一个巴黎矿业大学的工程师从 1887 年开始就向巴黎政府递交了受到伦敦地铁启发的巴黎地铁的规划方案，但却最终被拒绝了。甚至到 1899 年巴黎都会地铁公司（CMP）得到了政府授权建设巴黎地铁网络，他仍然固执的坚持为自己的规划争取机会。他作为法国的“黄金时代”的一个有远见的工程师，提出了仍然由可能建设的地铁线路方案。他的主要观点在于建设另外一条南北向的地铁线路，尽管已有地铁 4 号线为南北向，但在他看来，并不妨碍建设另外一条平行的线路来服务巴黎的西南部的街区。

1902 年 7 月份，Berlier 终于成立了巴黎北南地下电气铁路公司（Compagnie du Chemin de Fer Electrique Nord-Sud），不过巴黎市政府并没有任何的资金投入。尽管如此北南公司获得了建设三条线路的特许权。这三条线路分别是：

- 线路 A：从 Porte de la Chapelle 站到 Montmartre 站到 Montparnasse 站到 Porte de Versailles 站；
- 线路 B：从 Saint-Lazare 站到 Porte de Saint-Ouen 站和 Porte de Clichy 站；
- 线路 C：从 Montparnasse 站到 Porte de Vanves。

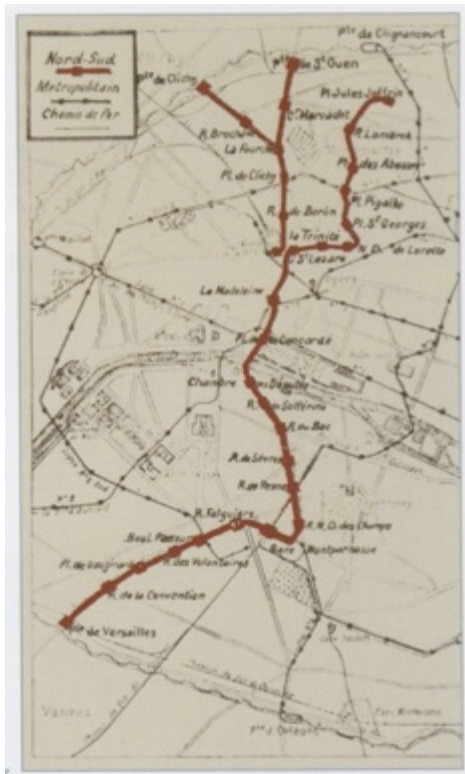


图 3.14 北南公司最初对于 A 线部分线路的设计（©Tricoire）

北南公司（Nord-Sud）开始着手修建三条线路中的两条，即 A 线和 B 线。A 线的轨迹特别复杂，弯曲着延伸向塞纳河的北部，穿过了蒙马特高地（Montmartre），连接了 Trinité 站和 Jules Joffrin 站。B 线的选线相对来说更简单，沿着巴黎的交通干线（Clichy 大道和 Saint-Ouen）。1910 年的巴黎水灾使地铁线路的建设速度减缓，但北南公司克服了种种困难，最终两条线路分别在以下的时间开放运营：

- 线路 A：于 1912 年 10 月 30 日开放运营 Porte de Versailles 站到 Jules Joffrin 站；
- 线路 B：于 1911 年 2 月 26 日开放运营 Saint-Lazare 站到 Porte de Saint-Ouen 站；于 1912 年 1 月 20 日开放运营 La Fourche 站到 Porte de Clichy 站（如图 3.14）；

北南公司（Nord-Sud）想要区别与巴黎大众公



司（CMP），以技术上的大胆创新、奢华优雅的车厢内部设计以及倾听乘客需求的形象吸引了巴黎人的眼球。因此，自从这两条线路开通运营之后，大量的巴黎人开始乘坐这两条线路。然而地铁修建的花费也非常惊人，到 1914 年为止，北南公司已经负债 14000 万法郎，而其规划的线路还没有完全建成。



图 3.15 1912 年的新 7 号线及 A 线和 B 线 ( ©AMTUIR )

这两条线路的建设和投入运营无非是与巴黎都会地铁公司（CMP）的地铁网络的直接竞争，于是该公司也很快投入了附加网络的完善建设工作，包括以下线路：

- 3 号线：从 Villiers 站到 Porte Champerret 站的延伸；
- 7 号线：Opéra 站到 Porte de la Vilette 站以及到 Porte du Pré Saint-Gervais 站分别于 1910 年 11 月 5 日和 1912 年 1 月 18 日投入运营。



图 3.16 1913 年所修建的地铁 8 号线部分线路 ( ©AMTUIR )

7 号线北端包括了穿过旧采石场 Buttes-Chaumont 的部分，在施工上又相当的困难，



因为其地质松软，在建设时不得不深挖至地下 35 米才到达地质结构比较稳定的区域，而 Buttes-Chaumont 站也成为了巴黎地下地铁站中比较深的站点之一。另外，在 Opéra 站的广场地下还修建了一个供三条线路使用的栈道，为之后 3 号线、7 号线和 8 号线的相交做出了准备。7 号线其中一个尾端的 Pré-Saint-Gervais 站的环状线路上包含了一个只单向运行的线路。同时，巴黎地铁历史上首次设计建设了 7 号线这样在线路一端分叉的树杈型线路：从 Opéra 站发来的列车或向 Vilette 站行驶，或驶向 Saint-Gervais 站。



图 3.17 两个地铁公司的 10 号线和 A 线在换乘站 Sèvres-Babylone 站分开的进站口  
( ©Tricoire )

巴黎都会地铁公司（CMP）于 1907 年也开始了 8 号线上 Porte d’Auteuil 站到 Opéra 站之间的建设。这段线路包括了两段从地下穿过塞纳河的部分：在 Javel 站和 Invalides 站。由于 1910 年水灾，该线路施工被延迟至 1913 年才得以完成，并在该年的 7 月及 9 月间逐步开放运营。8 号线的西部包括了一部分单向逆时针运行的环状线路（如图 3.16）。它主要位于 Auteuil 街区之下。该环状线路包含了三个单向站点。这个环状线路已于该年出现在 7 号线上了。8 号线环线 Auteuil 区的这几个站点建设时，同时还要满足和将来的 9 号线进行连接，当时 9 号线的施工工作也已经开始了。两家地铁公司在当时形成了一种竞争的局面（如图 3.17）。

### 3.2.5 1914 年至 1929 年：第一次世界大战及其对巴黎地铁建设的影响

1914 年 8 月 2 日，由于法国政府在一战期间采取的“全民动员”政策，巴黎地铁 2 号线、6 号线和 8 号线的地铁全线，以及地铁 5 号线和 7 号线的部分线路都停止了运营。在整个地铁网络运营管理上，运营时间缩短到了 7 点 30 分至 19 点 30 分。另外，169 个地铁站中的 106 个地铁站被关闭。1914 年 10 月 18 日，地铁公司聘用了一些女临时工，在这样的情况下巴黎地铁又逐步重新恢复运营。

在此之后，由于公共汽车的征用以及减少，导致地铁和轻轨的交通量大幅上涨。

由于征兵导致的男性员工数量的减少，巴黎都会地铁公司（CMP）和北南公司（Nord-Sud）不得不同时减少车辆的使用数目。同时，1914 年列车上的车门的关闭仍然是人工操作的，但之后由新的电气自动化的设备所取代，这样一来将原本一辆五节车厢的列车的工作人员由六个减少为了四个。

虽然受到战争的影响，但巴黎都会地铁公司（CMP）仍然将 7 号线由 Opéra 站延伸至了 Palais Royal，并于 1916 年 7 月 1 日开通运营。建设材料的缺乏，在两个新的地铁站点修建的比较简陋，并没有完成路面的砖块铺设，而直到战争结束才最终完成此项工作。与此同时，和北南公司（Nord-Sud）也完成了 A 线上 Jules Joffrin 站到 Porte de la Chapelle 站的扩展和延伸。这条线路后来在 1916 年 8 月 23 日开放运营。

在一次世界大战之后，巴黎的生活水平，包括食物和住宿的价格显著提高了，然而工资水平却没有随之增加。因此，巴黎的中产阶级也不得不一点点的向巴黎市周边的较贫困的街区迁移，还有的则留在巴黎市内接近 Thiers 城墙的地方。Thiers 城墙是巴黎最后一道城墙，修建于 1841 年到 1844 年，长 33 公里，面积 78 平方公里，在 1919 年到 1929 年期间城墙被拆除，转而修建了环城大道，但仍为巴黎市和郊区的分界线。这部分人口每天需要花费很多时间在公共交通上。

自巴黎都会地铁公司（CMP）运营初期起，其交通量在 1900 年到 1912 年之间一直稳定的增加着。而到了 1913 年到 1927 年之间，年客流量从 4.67 亿增加到了 7.92 亿。然而，通过观察在一次世界大战之前和一次世界大战之后的客流量的时间分布，就会发现一战之前地乘客的出行主要集中在他们自己所在的城区内，并且一整天内根据城市居民的日常需求，其各个时间段的出行分布较为均匀，而一战之后的几年中，出现了早高峰时期，从城市郊区向市中心方向的大量交通流，而晚上则出现了大量反方向的交通流。

由于交通需求的增加，地铁公司不仅仅要增加地铁运营的车次，同时还要设计能够满足高峰时期发车频率而设置的站台容量，否则没有足够的时间在两班列车之间疏散人群。列车与列车之间的间隔时间缩短为了 1 分 45 秒。同时，为了能够利用整个站台，列车的长度也增加至了 75 米。

1921 年，巴黎都会地铁公司（CMP）与巴黎市政府签订了一个关于资金资助的协议。在此之后，巴黎地铁进入了一个快速建设发展的时期。地铁公司重新开始了战前搁置的地铁网络的建设。四条新的线路从 1912 年起开始投入运营：

- 9 号线：Trocadéro 站到 Porte de Saint-Cloud 站；
- 3 号线：Place Gambette 站到 Porte des Lilas 和 Pré-Saint-Gervais 站；
- 环城铁路的 Invalides 站到 Saint-Germain 大道站；
- 9 号线：Trocadéro 站到 Opéra 站。

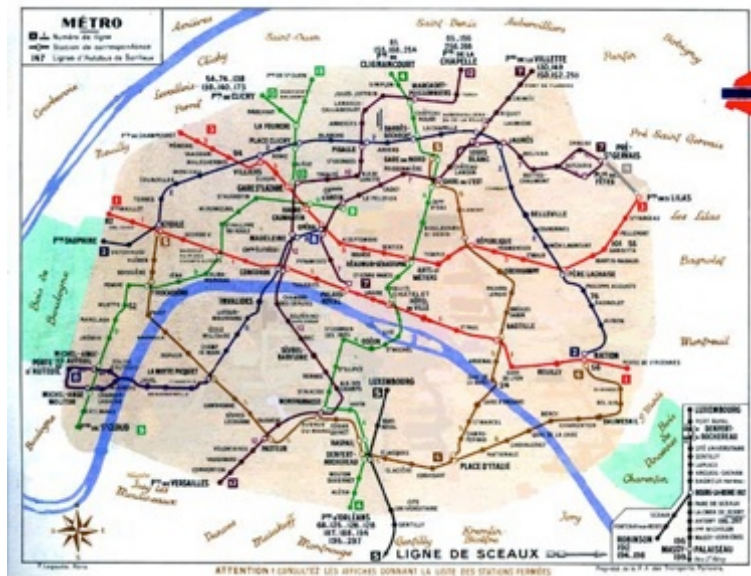


图 3.18 1923 年的地铁 9 号线部分线路 ( Porte de Saint-Cloud 站到 Opéra 站 )  
( ©AMTUIR )

1922 年 11 月 8 日，9 号线开始了 Exelemans 站和 Trocadéro 站之间的线路的修建，该线路之后于 1923 年 5 月 27 日开通至了 Saint-Augustin 站，并在之后的 6 月 3 日开通至了 Chaussée d’Antin 站。1923 年 9 月 29 日，9 号线延伸至 Porte de Saint-Cloud 的这一站，并与 10 号线尾端的环形线路的相交（如图 3.18）。

之后地铁公司一直在考虑建设一条沿着塞纳河服务巴黎市内左岸以及右岸的环形线路。该线路的最初的设计选线会沿着 Grands bouelvards 穿过塞纳河以及拉丁区（Quartier latin）。在 Invalides 站还专门为此设计了能够允许几条列车同时通过的轨道（包括已经建好的 8 号线）。但之后这个环线的方案并没有被实施，而 Invalides 站和 Saint-Germain 大道之间的线路被作为 10 号线开始进行修建。1923 年 12 月 30 日开通了 10 号线 Invalides 站到 Croix-Rouge 之间的部分（如图 3.19）。这条线上的交通量并不显著，曾经有几年时间内该线路上的列车仅仅有三个车厢。

在 10 号线逐步开通后，可以说是成为了巴黎地铁历史上最难以预测及变动最多的线路。最初在 1903 年，这条线路的最初规划方案是将连接 Auteuil 站和 Opéra 站，并且建设一个大型的换乘站来实现与 9 号线的换乘，然而这个方案并没有被实施。而与之替代的是 1910 年的另外一个规划方案：该方案中提出 10 号线将是巴黎内部的一个环线，始发于 Invalides 站并且终止于 Invalides 站，并将与其它直径穿越型线路或切线型线路相交。但这个方案也最终于第一次世界大战前夕被搁置了，而且再也没有被提出讨论过。如今，规划师对 10 号线的评价就是“它在巴黎左岸徘徊，很难找到自己的方向”。

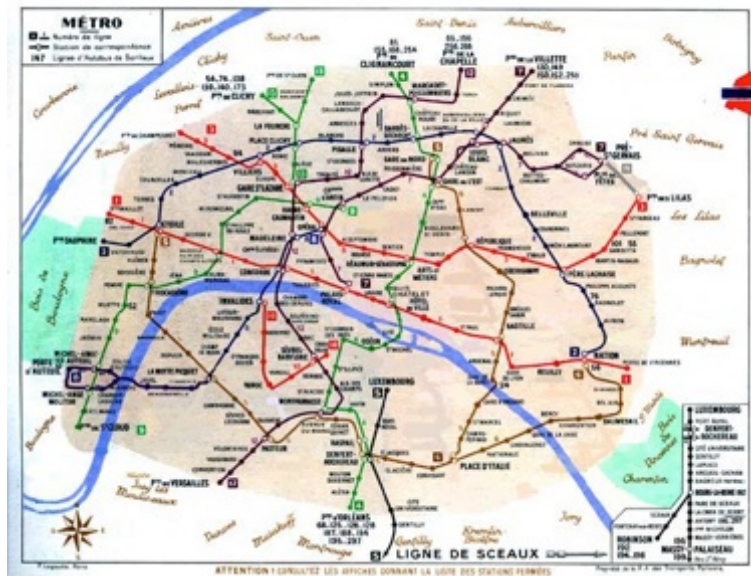


图 3.19 1923 年的地铁 10 号线的部分线路 ( Invalides 站到 Croix-Rouge 站 )  
( ©AMTUIR )

巴黎都会地铁公司（CMP）之后接下来进行了新线路扩建工程项目。在这些新的扩建线路中，12 号线该部分的修建计划最终被取消了，而 10 号线的最终选线也经历了一些变动。其中，新的扩建项目具体包括以下线路：

- 7 号线：Opéra 站到 Porte d’Ivry 站；
- 8 号线：Opéra 站到 Porte de Charenton 站；
- 9 号线：Chaussée d’Antin 站到 Porte de Montreuil 站；
- 10 号线：Croix-Rouge 站到 Bastille 站；
- 11 号线：Châtelet 站到 Porte des Lilas 站；
- 12 号线：Porte d’Orléans 站到 Porte d’Italie 站。

首先实施的是 7 号线、8 号线、10 号线以及 9 号线到 République 的部分线路。8 号线和 9 号线平行并沿着道路建设的部分，以及 7 号线和 10 号线穿过塞纳河的部分都需要同时进行施工。10 号线 Croix Rouge 站到 Odéon 站的扩建线路部分则在 1925 年 3 月 10 日开通到了 Mabillon 站，并最终在 1926 年 2 月 14 日运营到了 Odéon 站。1926 年 4 月 16 日，7 号线的扩建从 Palais Royal 站到 Pont Marie 站的部分开通运营。

8 号线和 9 号线的延伸，相比之下更为复杂，需要建设 Grands Boulevards 大道下的两条相互叠加的隧道。这两条线路首先分别于 1928 年 6 月 30 日，从 Opéra 站以及 Chaussée d’Antin 站延伸到了 Richelieu-Drouot 站。这次扩建 8 号线的站台由原本的 75 米增加到了 105 米。因此列车的容量也可以相对增加，由五节车厢增加到七节车厢。





图 3.20 1916 年到 1933 年间陆续开放的地铁网络 ( 红色部分线路 ) ( ©Tricoire )

如图 3.20 所示，黄色部分的地铁线路为已经开放的线路，而红色部分的地铁线路为在 1916 年到 1933 年间陆续开放的线路，其中包括了 3bis 线，7 号线、8 号线和 10 号线的部分线路，9 号线的大部分线路以及 12 号线南端的一小段线路。可以看出，黄色线路所构成的地铁网络已经形成了基本框架，即包括了两个半环线、多条与塞纳河垂直方向的直线穿越型地铁线路以及一条与塞纳河平行的直线穿越型线路（2 号线）。而红色部分在 1916 年到 1933 年间陆续开放的线路则主要包括了多条与塞纳河平行方向的地铁线路。这对于之前的地铁网络来说，起到了一定的补充作用。使得整个地铁站点在巴黎的分布更为均衡。

实际上，上世纪二十年代的地铁网络建设经常受到巴黎市政府地铁委员会的政策变动的影 响（与巴黎都会地铁公司没有关系）。当时的地铁委员会时而倾向于服务各个城区的线路，方便居民的近距离出行，但时而又倾向于穿越整个城区的线路方案，以满足巴黎人因为社会经济生活而日益增加的长距离出行的需求。不过这些不同的扩建项目仍然还是只涉及到巴黎市；之后 1919 年便开始逐步出现了对多个服务巴黎市区的线路方案的研究。这一年开始，想要建设两条穿过巴黎市区，连接郊区的火车线路，并且载客量更大的区域地铁线路的思想已现雏形，然而直到 1970 年才以 RER A 线的形式出现了第一条区域快轨线路。

### 3.2.6 1930 年至 1939 年：地铁线路向巴黎郊区延伸

尽管北南公司（Nord-Sud）仍然在进行准备建设 C 线（Vanves 站到 Montparnasse 站）的必要步骤，然而 1930 年 12 月，由于经济危机的影响，北南公司（Nord-Sud）被巴黎都会地铁公司（CMP）所兼并。从此之后，北南公司（Nord-Sud）不复存在，其建设的地铁线路也归入巴黎都会地铁公司（CMP）的地铁网络之中，即地铁 A 线和 B 线也分别成为了 12 号线和 13 号线。

在 1920 年代末期，多条线路的扩建完成之后，巴黎的地铁网络长度已达 150km 左右，并且覆盖了整个市区，巴黎的地铁已做好了向市郊发展的准备。接下来，各条线路都会穿过环城大道向巴黎市外延伸，并且在几十年之后最终开始 RER 远城快轨的修建。而经过了漫长的经济危机时期，法国的各项社会经济活动在一次世界大战之后又迎来了复苏。巴黎地铁的年客流量在 1931 年达到了 9.29 亿人次。

从 1901 年到 1930 年，巴黎市区及其郊区的人口不断增加。巴黎市区人口从 266 万增加到了 287.1 万，而其近郊塞纳省的人口也从 367 万增加到了 488.7 万。在不到法国国土面积五十分之一的区域内居住了 15% 的法国人口，将近 700 万人口，这一人口数据的改变也将影响巴黎地区的规划政策和方案。为了发展巴黎近郊的发展，需要优化巴黎市区外的公共交通的服务，而之前仅服务巴黎市区的地铁网络则需要穿过城墙向其郊区延伸以便服务更多的居民。

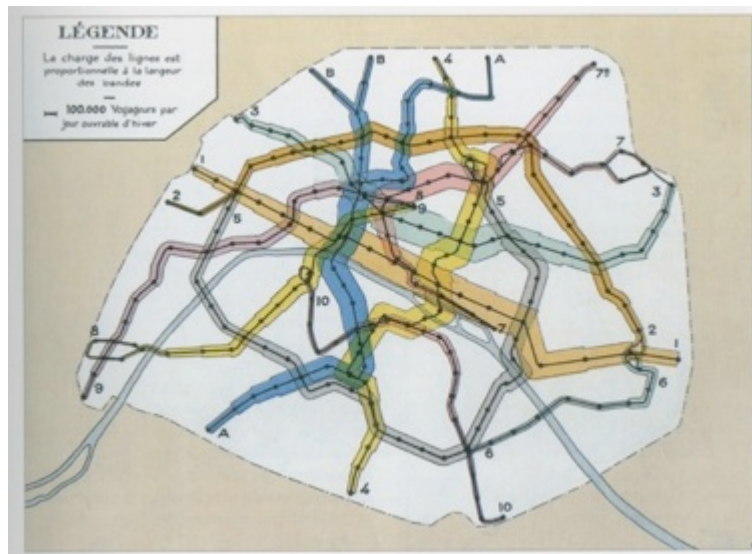


图 3.21 1930 年各条线路上的客流量大小（用缓冲区宽度表示）（©Tricoire）

在这样的情况之下，向郊区延伸的地铁扩建方案不断被提出。而在这些方案真正实施之前，巴黎都会地铁公司（CMP）首先完成了巴黎市内的地铁网络的完善。1930 年 3 月 7 日，地铁 10 号线由 Odéon 站被延伸至于 Porte de Choisy 站。但由于该线路的选线与交通流向不符导致客流量非常少。1930 年 6 月 3 日，7 号线从 Pont Marie 站修建至于 Sully-Morland 站。该线路本来将要向南穿过塞纳河并延伸至 Jussieu 站，该站将

是 7 号线和 10 号线的换乘站。但最终决定将 10 号线 Mauvert 站到 Porte de Choisy 站（延伸至 Porte d'Ivry 站）的部分自 Jussieu 站之后纳入 7 号线。这项建设的改动从 1931 年 4 月 26 日起实施。自此之后，7 号线从 Sully-Morland 站延伸到了 Porte d'Ivry 站，而 10 号线则在 Jussieu 站终止（如图 3.22）。

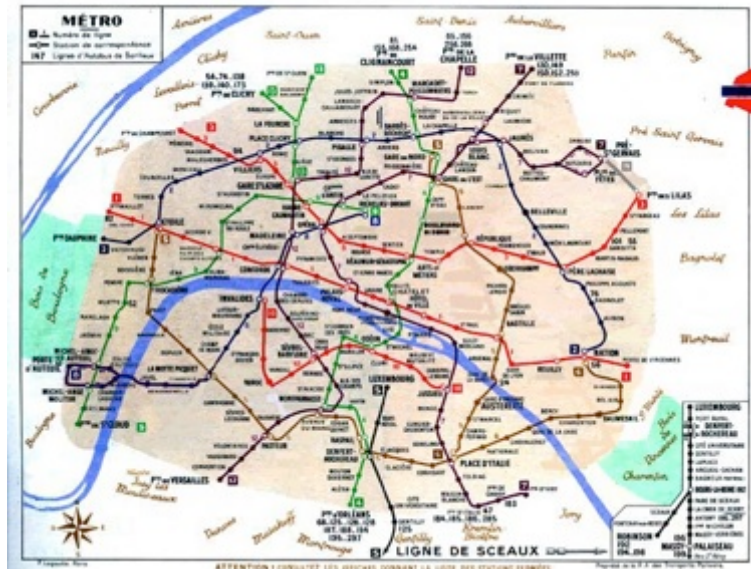


图 3.22 1931 年改动后的 7 号线和 10 号线 (©AMTUIR)

1931 年在 Bois de Vincennes 举行的博览会，让 8 号线的建设施工有机会能够继续进行。这条线路自从 1928 年起就停留在 Richelieu-Drout 站，它的扩建包括沿着 Grands Boulevards 大道经过 Bastille、La Faubourg Saint-Antoine、Rue de Reuilly、Place Daumesnil 一直到达 Porte de Charenton。这 17 个新的地铁站都需要有 105 米长。9 号线的扩建也包括了与 8 号线公共的沿着 Grands Boulevards 大道的一部分线段，这让具体的施工变得非常有难度。8 号线的扩建施工从 1928 年开始一直持续到 1931 年 3 月，同年 5 月份 8 号线扩建部分正式开通运营。

在巴黎内部的地铁网络初步建成之际，地铁公司准备开始将各条线路延伸至巴黎郊区，其中被认为比较紧要的几条线路的扩建包括：

- 1 号线：Porte de Vincennes 站到 Château de Vincennes 站；
- 3 号线：Porte Champerret 站到 Pont de Levallois 站；
- 9 号线：Porte de Saint-Cloud 站到 Pont de Sèvres 站；
- 12 号线：Porte de Versailles 站到 Mairie d'Issy 站。

9 号线的 Porte de Saint-Cloud 站到 Pont de Sèvres 站的向市郊的扩建首先在 1934 年 2 月 3 日开通运营。这次扩建的落成仪式举行的非常隆重，因为这是巴黎地铁历史上首次突破了巴黎市行政区的界限而向郊区延伸，这标志着已经开始了巴黎近郊与市区的整合。1 号线和 12 号线的扩建线路则在 1934 年 3 月 24 日开通运营。

于此同时在巴黎市内部，一条新的线路也正在施工中。地铁 11 号线原本设计连接



République 站和 Belleville 站，将重建原有的 Belleville 轻轨的线路。而该线路将一直延伸至市中心的 Châtelet 站。1935 年 4 月 28 日，11 号线 Châtelet 站到 Porte des Lilas 站之间的线路正式开通运营。

自从第一期的地铁线路向郊区的扩建计划完成后，接下来其他一些地铁线路的扩建完善计划也浮出了水面：

- 1 号线：Porte Maillot 站到 Pont de Neuilly 站；
- 3 号线：Porte Champerret 站到 Pont de Levallois 站；
- 9 号线：Porte de Montreuil 站到 Mairie de Montreuil 站；
- 11 号线：Porte de Lilas 站到 Port de Rosny 站 (最后停止在了 Marie des Lilas 站)。

11 号线的扩建在 1937 年 2 月 17 日开通。1 号线的扩建遇到了一个主要的难题：1900 年建设的环形终点站。最后采取的方案是完全放弃原来旧有的设施，而是重新在旧有站点西部再建设一个新的有四条轨道的 105 米长的站台，并最终在 1936 年 11 月 15 日开始运营。到 Neuilly 的扩建则到 1937 年 4 月 29 日向公众开放。3 号线的扩建线路于 1937 年 9 月 24 日开通运营，之后是 9 号线到 Mairie de Montreuil 站的扩建于 10 月 4 日向公众开放。

对于巴黎市区，巴黎市政府在 1932 年经过讨论研究认为仍有可能对城市网络进行一定的改良。旧有的北南公司 (Nord-Sud) 还遗留有 C 线的规划，之后被命名为 14 号线，线路由 Porte de Vanes 站到 Montparnasse 站。在巴黎都会地铁公司 (CMP) 获得特许的地铁线路建设计划中还包括 8bis 线，它是 8 号线从 Motte-Picquet 站到 Porte de Sèvres 站的支线。另外，在同一区域内，还有选线失败，没有沿着交通需求走向而建的地铁 10 号线。

综合这些考虑之后，巴黎市政府决定要修建 8bis 线和 14 号线，以及对 8 号线和 10 号线进行一定的改动。之前的 10 号线在 Duroc 站被切断，它的北部的线路 Invalide 站到 Duroc 站被接入 14 号线延伸至 Gare Montparnasse 站，而其东部的线路 Jussieu 站到 Duroc 站，与之前 8 号线上的 Motte-Picquet 站到 Auteuil 站的部分相连接而继续延伸至 Motte-Picquet 站。而 8 号线则是沿着之前设计的 8 号线支线 8bis 的路径延伸至 Porte de Sèvres (今天的 Place Balard 站)。

14 号线在 Montparnasse 站到 Porte de Vanves 站的部分于 1937 年 1 月 21 日开通运营。而三条线路之间由 Motte-Picquet 站到 Duroc 站之间的改动，由于需要对 Motte-Picquet 站进行重要的重建工作，因此直到 1937 年 7 月 27 号才开通运营。

最后在 1939 年 7 月 12 日，第二阶段的线路扩建工作中最后的 10 号线上的 Jussieu 站到 Gare d'Orléans-Austelitz 站之间的线路也竣工了。接下来一轮的线路扩建中主要涉及到以下线路：

- 5 号线：Gare du Nord 站到 Porte de Pantin 站 (1936 年 8 月开始施工)；
- 5 号线：Porte de Pantin 站到 Eglise de Pantin 站；

- 7 号线 : Porte d'Ivry 站到 Mairie d'Ivry 站;
- 8 号线 : Porte de Charenton 站到 Charenton-Ecoles 站。

这三条线路的扩建工作从 1937 年开始, 到 1939 年时工程已经进展的非常之快了。但之后开始的第二次世界大战让这些线路的扩建工作不得不暂时停止下来。



图 3.23 1934 年到 1942 年间陆续开放的地铁线路 ( 红色部分线路 ) ( ©Tricoire )

如图 3.23 所示, 黄色部分线路为已建成开放的地铁线路, 而红色部分则为在 1934 年到 1942 年间新建设开放的地铁线路。从图中我们可以看到黄色部分的地铁网络线路已经相对来说比较完善了, 而红色部分新建的线路主要是已有地铁线路向郊区的延伸, 而在巴黎市内部的几条线路改动主要是 8 号线、10 号线以及 14 号线这三条线路之间的变动, 以及 11 号线这条新地铁线路的修建。由此可以看出到了 1934 年之后, 巴黎地铁的建设已经进入了一个新的阶段, 除了巴黎市内个别线路间的调整, 和个别新线路的修建之外, 主要还是对已有线路向郊区的延伸。

### 3.2.7 1939 年至 1949 年：第二次世界大战及其对巴黎地铁建设的影响

在前 40 年的初期建设之后, 巴黎地铁网络进入了一个相对缓慢的发展时期, 很长一段时间地铁网络都持续着其 1939 年时的形态。德军占领时期导致的公共汽车的无序状态为巴黎地铁带来了史无前例的客流量。而在战争之后的经济困难, 以及公众对于城市交通的消极态度, 开始了巴黎地铁历史上一段墨守成规的时期。

在 1939 年 9 月 2 日, 第二次世界大战爆发的第二天, 整个巴黎地铁系统就减少了其服务的站点: 2 号线、6 号线、11 号线和 14 号线全线停止运营, 而其他线路的大部分路段只有部分运营, 其中共有 85 个地铁站点仍然开放。直到 11 月份整个地铁网络中的其它线路才开始逐步恢复运营。只有少量的高架线路, 由于容易受到轰炸的攻击而仍然关闭着。在 1939 年到 1940 年的冬天, 人们的外出活动非常有限, 地铁继续运

营着，但列车几乎是空的。1940年2月有196个地铁站开放正常运营。自从德军从1940年6月14日进驻巴黎之后，巴黎地铁的服务仍然进行着，但交通量非常之少。

之后到9月份交通流量逐步回升，整个地铁网络又开始重新恢复运营了。很快的，到1940年底，日交通量比1938年要高出15%。在地面上，公共交通线路被减少到只剩郊区的主要线路和巴黎内部的几条线路。这个情况与1914年不同：巴黎又重新开启了在1938年就取消了的轻轨网络。之后地铁年客流量又持续增加，到1941年超过了十亿。在这一时期中，由于为了保证供电的煤炭用量，巴黎都会地铁公司（CMP）为了降低能源消耗，不得不关闭某些地铁站，减少照明，以及停止一些电动扶梯的装置。同时，巴黎都会地铁公司（CMP）从巴黎区公共交通公司（STCRP）接手了对巴黎区公共汽车运营的管理权，并于1942年1月1日开始实施。

在二战初期，三条线路正在建设当中，其中包括5号线到Eglise de Pantin站的建设项目，8号线扩建到Charenton站的建设项目，以及7号线扩建到Mairie d'Ivry站的建设项目。这几个工程项目中的前两条线路在1942年10月开通运营，而7号线的扩建工程被推迟了。

5号线的扩建包括了与6号线的互调。5号线将在Place d'Italie被切断，而6号线将整合其从Etoile站到Italie站的部分而形成巴黎地铁网络南部的半环线型线路。13号线的从Porte de Saint-Ouen站到Carrefour Pleyel站的工程也等到1941年才开始动工。

1945年到1946年地铁年客流量达到了历史顶峰的15.98亿人次。战后石油燃料和汽车轮胎的回归带来了以私人小汽车方式来庆祝自由的热潮。以个人的方式来去自由的私人汽车将自由的概念具体化，即使是交通拥堵和汽油价格的上涨也阻止不了这股热潮。政府顺应着人们“现代化”的心声，鼓励着私人交通的发展而对公共交通的发展漠不关心，在包括巴黎特别是在巴黎以外的省市中这种现象极为明显。

从战争结束之后，7号线的扩建工作马上继续进行，并且于1946年5月1日向公众开放。而13号线上向Carrefour Pleyel站扩建的工作也于1950年初重新启动并竣工，但由于列车上所采用的新型材料的缺乏，这部分新的线路也直到两年后才正式开放运营。

### 3.2.8 1949年至2000年：RER 城际快轨的修建

自从1949年初，巴黎大众运输公司（RATP）成立之日起，巴黎市进入了一个地铁发展的保守时期：在1952年之后的二十年之内都没有新的地铁线路的建设。该公司取代了巴黎都会地铁公司（CMP）负责经营管理巴黎地铁及公共汽车等公共交通。而当时的小汽车发展吸引了公众全部的注意力以至于人们完全失去了对于公共交通的兴趣。实际上，包括地铁在内的公共交通方式在当时都被认为在不久的将来会被取消掉。政府拨给公共交通的资金支持也逐年减少。巴黎的交通路网设施的维护和更新也非常

缓慢，例如那些老旧弃用的公交站台，一直到战后二十五年才逐渐消失。

快到 1950 年的时候，巴黎地铁几乎无人问津，而路面上却交通拥堵。当时有人这样在文献中描述巴黎地铁：“即使仍然算得上是世界上最美的地铁，但巴黎地铁从几年起就已经开始逐步过时了。”

在十九世纪末及 20 世纪初的美好年代（Belle Époque），巴黎人乘坐地铁主要是因为当时的马车即缓慢又不舒适，而且经常会遇到拥堵的情况。如果是步行的方式出行仍然要花费许多的时间。地铁的开通服务将人们出行的时间减少到了一半甚至三分之一。但之后马车被更快的公共汽车所取代，并且还有有轨电车、以及小汽车的出现，都比以地铁出行的方式要快。在 1900 年到 1950 年间，巴黎地铁的平均速度始终停留在 18km/h 到 24km/h 之间。

在那个年代，地铁可以说是巴黎最便宜的交通出行方式，而乘坐地铁的乘客也主要是工人、职员等经济拮据而没有其他选择的人。他们如果不坐地铁的话，也只有采用步行的方式。经济情况比较优越的巴黎人只有在一种情况下会乘坐地铁：希望能够确保在一定时间内到达目的地，因为乘坐公交或出租可能会因为交通拥堵而存在不确定性。在当时来说，市民都清楚如果没有巴黎地铁的话，那么路面交通肯定会更加糟糕。然而，谁也不愿意因此而做出牺牲乘坐地下的交通，而是都希望能够乘坐路面交通。

在公众对城市公共交通失去兴趣的很长一段时间之后，地铁又重新受到了关注。让人窒息的小汽车拥堵和空气污染让地铁重新找到了它在城市中的重要地位。随着政府给巴黎大众运输公司（RATP）的津贴越来越丰厚，该公司从 1958 年起就开始着手地铁列车的升级和地铁站的翻新工作。在之后的十年中，巴黎还终于迎来了区域地铁快轨（RER）新线路的扩建。

从上世纪六十年代起，巴黎大众运输公司（RATP）和法国国营铁路公司（SNCF）就开始进行了交通需求量的研究。在 1965 年，巴黎地铁仍然能够按照 1930 年时所预计的那样满足巴黎区人们的出行需求。然而当地铁逐渐向巴黎郊区延伸之后，由此引进了新的交通流，旧有的运行缓慢及车厢狭窄的巴黎地铁已经不能够满足新的交通需求了。因此需要建设运行快速并且有更大容量的线路，也正是出于这个目的，巴黎开始动工修建区域地铁快轨（RER）。

相关文献记载中有提到关于巴黎地铁与城际快铁之间的关系的政府决策，旨在提高大巴黎地区的多交通模式的构建。其中具体指出巴黎地铁应该与城际铁路以及各种路面交通如轻轨和公汽等形成一种互相完善及配合的模式。各种不同的交通模式之间的运营应该和谐的合作而不是形成竞争。最初的区域快轨设计（RER）是将来的 A 线和 B 线一方面将会连接 Saint-Lazare 站和 Bastille 站的部分，另外一方面将会包括已有的经过 Sceaux 地区的火车轨道线路（如图 3.24）。



图 3.24 区域地铁快轨 ( RER ) 的首个线路规划 ( ©Tricoire )

1962 年开始的建设施工，一直持续了三十年最后建成了五条线路。首先在 1969 年 12 月开通运营了 Boisy-Saint-Léger 站到 Nation 站的第一段线路，之后在 1970 年继续进行 Etoile 站到 La Défense 站之间的施工建设。

相反，近郊的交通运营还是主要由地铁来负责，虽然扩建计划很久未实施，但也逐步在提上日程。地铁网络自 1952 年起就没有进行任何扩建工作，至此将要进入一个新的发展阶段，并且将会一直持续到世纪末。1965 年和 1967 年分别有三段扩建工程将随之展开，它们分别是：

- 3 号线：Gambetta 站到 Galliéni 站；
- 8 号线：Charenton-Ecoles 站到 Maisons-Alfort 站；
- 13 号线：Saint-Lazare 站到 Miromesnil 站。

3 号线的扩建将需要从 Gambetta 站到 Porte de Lilas 站隔开，然后以 3 号线支线的方式进行扩建。施工从 1967 年开始，由于线路所穿过的地质问题而使施工变得困难且缓慢。而且在 Gambetta 站要对原有的终点站环形轨道设施等进行改建。最终新的 Gambetta 站于 1969 年 8 月 23 日开通运营，而向 Porte des Lilas 的扩建线路于 1971 年 3 月 27 日开通运营，最终向 Galliéni 站的扩建线路于 4 月 2 日开通运营。

8 号线扩建的实施主要是由于 Pont de Charenton 的饱和扰乱了公共公交的运营。原来预计扩建项目将延伸至 Maison-Alfort 体育馆站，但最终则一直扩建至了 Créteil-Préfecture 站。并且在这段延伸线上首次设置了出口处的检票设备（该设备主要存在于 RER 线路上）。由于扩建线路穿过了马恩河 (Marne)，因此该延伸线上还专门修建了一段高架线路。1968 年着手，线路的扩建逐步在以下阶段开放运营：

- 1970 年 9 月 19 日：扩建至 Maison-Alfort (Stade)站；
- 1972 年 4 月 27 日：扩建至 Maisons – Alfort (Les Juilliottes)站；

- 1973 年 9 月 26 日：扩建至 Créteil (L'Echat)站；
- 1974 年 9 月 10 日：扩建至 Créteil (Préfecture)站。

对于 13 号线的扩建部分，及其与 14 号线的连接来说，主要包括：Saint-Lazare 站和 Invalides 站之间的连接，13 号线北端一方面向 Saint-Denis 方向的扩建，另一方面向 Genevilliers 方向的扩建，以及 14 号线南端向 Châtillon 站的延伸。该线路施工中的重要部分在于从地下穿过塞纳河的部分以及 Invalides 站的环形轨道的改建。在郊区，轨道向北到 Genevilliers 站的部分还有一段高架穿过塞纳河的部分；在南边，该线路主要沿着法国国家铁路的轨道行驶。

施工主要分为七年来进行：

- 1973 年 6 月 27 日：Saint – Lazare 站到 Miromesnil 站；
- 1975 年 2 月 18 日：Miromesnil 站到 Champs – Elysées – Cémenceau 站；
- 1976 年 5 月 21 日：Carrefour – Pleyel 站到 Saint-Denis-Basilique 站；
- 1976 年 11 月 10 日：Champs-Elysée 站到 Invalides 站以及 Porte de Vanves 站到 Châtillon 站的扩建；
- 1980 年 5 月 9 日：Porte de Clichy 站到 Genevilliers 站。

在之后的 1979 年到 1982 年之间，7 号线、10 号线及 13 号线上向郊区延伸的一系列线路的扩建将逐步展开。7 号线于 1979 年 10 月 14 日延伸至 Fort d'Aubervilliers 站。13 号线则于 1980 年 5 月 9 日延伸至 Genevilliers 站。最后 10 号线于 1981 年 10 月 2 日开通运营至 Boulogne-Pont de Saint-Cloud 站。而 7 号线的南端最后于 1982 年 12 月 10 日又由 Maison Blanche 站延伸扩建至 Kremlin-Bicêtre 站。这段扩建包括了一段树杈型线路，其中一个方向通往 Mairie d'Ivry 站，另外一个通往 Bicêtre 站。



图 3.25 1946 年到 2000 年开放的地铁线路 ( 红色部分线路 ) ( ©Tricoire )



如图 3.25 所示，黄色部分线路为 1946 年之前已经修建好的地铁线路，而红色部分线路则为 1946 年到 2000 年之间开放的地铁线路。从图中我们可以看出，在 1946 年之后新开放的地铁线路主要是多条地铁线路向郊区的延伸，包括 1 号线、3 号线、5 号线、7 号线、8 号线、10 号线和 13 号线。到此阶段为止，巴黎内部的地铁网络已经趋于完善，而巴黎内部新修建开放的线路仅包括 13 号线的南北段部分的接合，以及一条沿塞纳河修建的新线路 14 号线。而这条新线路的修建实际上旨在缓解 1 号线上的交通量压力，而同时期修建的 RER A 线也与 14 号线部分线路吻合。可见到了这个阶段，巴黎地铁网络的发展和完善主要集中在城市内部与郊区的通勤之上。

### 3.3 巴黎及其郊区地铁 2013 年现状

如今，巴黎地铁是世界上几个著名的地铁系统之一。巴黎的第一条地铁线路是为了 1900 年的世界博览会而建造的。在其一个世纪多的发展之后，地铁系统对城市的结构有了非常显著的影响，不论是从各种日常生产生活的可达性或是节奏上来说都是如此。此地铁网络全长 214 公里，由 303 个地铁站点和 16 条地铁线路组成（其中包括 3bis 和 7bis 两条支线）。巴黎地铁站分布的密度非常大，为巴黎市民的日常出行提供着便捷的服务：最短的平均站间距离为 4 号线的 424 米，而最长的则为 14 号线上的 1 公里。然而，巴黎郊区的地铁站分布却大不如巴黎市中心，仅仅依靠穿过巴黎市内的地铁线路延长线从一个社区通向另外一个社区（如图 3.26 所示）。

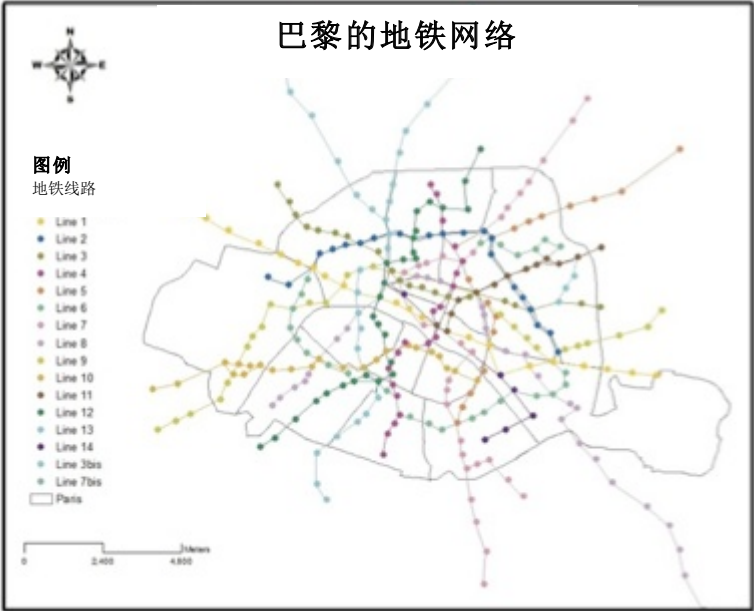


图 3.26 巴黎的地铁网络  
( 数据来源 RATP Open Data , ©王曦 )

巴黎的大部分线路（218.4 公里中的 198.4 公里）都是在地下的，但巴黎中心区的 2 号线、5 号线和 6 号线的部分线路以及巴黎郊区的 1 号线、5 号线、8 号线和 13 号线的部分路段是在高架或者地上的。由于巴黎的地质条件的影响，难于修建很深的隧道，因此修建地铁线路的隧道都是接近于地表的。当然，也有一些例外，如 Ménilmontant 区和 Montmartre 区等。由于较浅的隧道不得不沿着巴黎城市道路的走向而修建，因此巴黎的地铁隧道，特别是地铁修建初期的线路通常都是弯弯曲曲的。

表 3.2 显示了巴黎地铁各条线路的开放时间、最后扩建时间、站点数以及平均站间距等信息。在巴黎地铁历史发展的进程中，由于某些历史或经济上的原因，有一些站点从来都没有对公众开放过，或者开放一段时间后又被关闭了，它们被统称为“幽灵车站”。其中最知名的又 5 号线上的 Arsenal 站，9 号线和 10 号线上的 Porte Molitor 站等等。

表 3.2 巴黎地铁线路的相关信息

地铁线路	开放时间	最后一次扩建	站点总数	平均站间距
线路 1	1900 年	1992 年	25	692 m
线路 2	1900 年	1903 年	25	513 m
线路 3	1904 年	1971 年	25	488 m
线路 3bis	1971 年	1971 年	4	433 m
线路 4	1908 年	1910 年	26	424 m
线路 5	1906 年	1985 年	22	695 m
线路 6	1909 年	1942 年	28	504 m
线路 7	1910 年	1987 年	38	605 m
线路 7bis	1967 年	1967 年	8	443 m
线路 8	1913 年	2011 年	38	614 m
线路 9	1922 年	1937 年	37	544 m
线路 10	1923 年	1981 年	23	532 m
线路 11	1935 年	1937 年	13	525 m
线路 12	1910 年	2012 年	29	515 m
线路 13	1911 年	2008 年	32	776 m
线路 14	1998 年	2007 年	9	1129 m

巴黎地铁的乘客人数在 1995 年（1030 万）到 2005 年（1370 万）的十年间增长了 30%。乘客的出行习惯也发生了变化，周末出行的交通量相比十年前提高了 1.5 倍。早高峰时间主要在 8 点半到 9 点之间，而晚高峰则可持续至晚上八点半左右。巴黎地铁公司（Régie Autonome des Transports Parisiens，简称 RATP）从 2006 年开始就增加了列车的频率，然而周末及夜晚的地铁上还是非常拥挤。随着乘坐地铁出行的人数不断增加，地铁 1 号线、4 号线和 13 号线成为了几条最拥挤的地铁线路。

如图 3.27，巴黎的地铁系统同样也整合了 RER 区域快铁。用同样的交通卡或者地铁票，乘客们可以自由的在地铁系统以及 RER 系统中进行换乘。与地铁系统不同的是，它主要服务于巴黎及其郊区之间的通勤的区域轨道系统。其站点之间的距离也比地铁

站间距要大（平均 2 为公里）。

地铁在为巴黎市民提供出行服务的过程中扮演着越来越重要的角色，由于巴黎机动车交通拥堵的情况促使了巴黎市区的两百万人口中又近 50%的出行（包括 RER 有 150 万次出行）交通是通过地铁进行的，并且远超于机动车的 26%以及公汽的 17%。

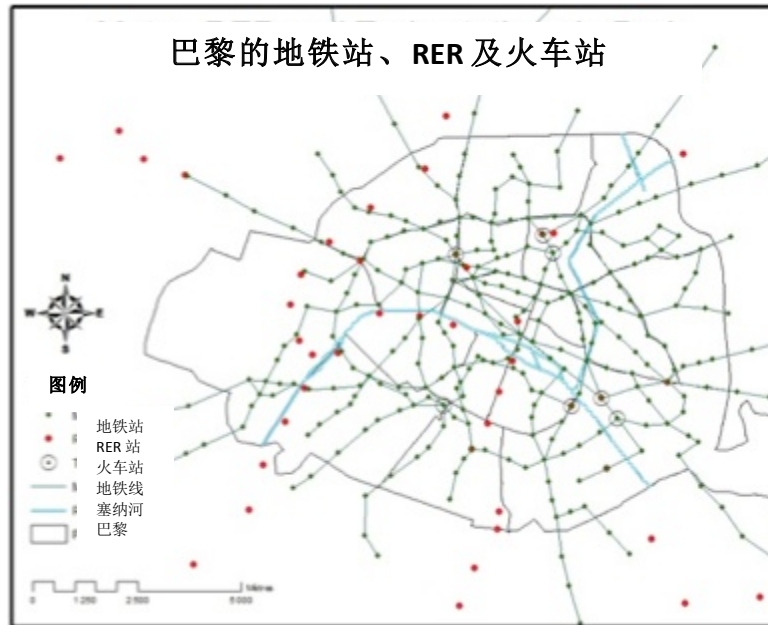


图 3.27 巴黎的地铁站、RER 以及火车站  
(数据来源 RATP Open Data , ©王曦)

在此研究中，RER 区域快铁网络并没有被考虑进来。然而，由于 RER 与地铁在其换乘站处有大量的交通流量的交换，因此这些换乘站还是被给予了特别的考虑。本研究中所用到 GIS 数据库是基于巴黎大众运输公司（RATP）网站上提供的开放数据 (Open Data) 而创建的 (RATP 2013)。

### 3.4 研究数据收集及创建 GIS 数据库

如表 3.3 所示，为有关巴黎的 GIS 数据列表，其中表明了数据所包含的属性以及数据来源。其中关键的地铁系统现状、RER 区域快轨以及入站交通量来源于 RATP 地铁公司在网上公开的开放数据 (Open Data)。而道路网络则是来源于法国国家地理学院 (IGN) 的 BD TOPO 数据。剩下的如行政区划图及水体则是来源于 Open Street Map (OSM)。

表 3.3 有关巴黎的 GIS 数据库

数据	包含的属性	数据来源
巴黎火车站	名称、开放时间、换乘	自行创建
地铁系统现状数据	坐标值、名称、所属地铁线、开放时间、交通量、换乘等	RATP 的开放数据 (Open Data)
地铁系统历史数据	线路名、开放时间、长度、站点数	根据『地铁系统现状』数据及地铁系统历史资料自行创建
RER 区域快轨	名称、所属线路	RATP 的开放数据 (Open Data)
入站交通量	名称、交通量	RATP 的开放数据 (Open Data)
道路网络	名称、类型	IGN 数据
行政区划图	名称	Open Street Map (OSM)
人口密度	区域名、人口密度	INSEE
水体	名称	Open Street Map (OSM)

如表 3.4 所示，为有关武汉的 GIS 数据列表，其中表明了数据所包含的属性以及数据来源。由于武汉地铁网络还在建设当中，官方公布的数据资料等有限，并且也没有太多可参考的相关研究，因此大部分武汉地铁数据都是根据仅有的官方及网络资源在 ArcGIS 中进行自行创建的。而道路网络、行政规划、人口密度和水体数据则是来源于武汉市国土资源和规划局的信息中心。

表 3.4 有关武汉的 GIS 数据库

数据	包含的属性	数据来源
武汉火车站	名称、开放时间、换乘	自行创建
地铁系统现状数据	坐标值、名称、所属地铁线、开放时间、交通量、换乘等	根据网络资源自行创建
地铁系统规划数据	线路名、开放时间、长度	根据官方规划图自行创建
道路网络	名称、类型	武汉市国土资源和规划局
行政区划图	名称	武汉市国土资源和规划局
人口密度	区域名、人口密度	武汉市国土资源和规划局
水体	名称	武汉市国土资源和规划局

### 3.5 本章小结

本章主要探讨了巴黎市的基本情况，包括城市概况、城市规划与发展以及其交通体系概况。之后我们进一步分析了巴黎地铁网络发展进程中的不同阶段，每一个阶段中巴黎地铁的规划、建设等相关的重要事件，其中包括巴黎地铁之前的诸多规划方案，到巴黎地铁网络的初步形成和完善，以及两次世界大战中受到的影响，到最后巴黎地铁线路向郊区的延伸以及 RER 城际快轨的修建等。最后我们对巴黎地铁的现状进行了介绍，并回顾了数据收集及 GIS 数据库创建的过程。

巴黎地区的城市规划政策在 20 世纪初期主要是以控制巴黎地区的延伸和扩张为主，

例如规划师 Henri Prost 制定的巴黎地区空间规划 PROST，1934 年颁布的《巴黎地区国土开发计划》(PARP 规划)，以及 1958 年之后法国政府制定的《巴黎地区国土开发与空间组织总体规划》，建成 PADOG 规划。这些规划的主旨都非常一致的致力于遏制郊区蔓延和追求城市整体均衡发展上面。而到 1965 年巴黎大区政府成立之后所出台的《巴黎大区国土开发与城市规划指导纲要 (1965-2000)》，简称 SDAURP 规划，则是巴黎地区城市规划的一个转折点。该规划提出要在完善城市建成区的同时，在城市外围寻找城市化可能的发展空间，并在塞纳河和马恩河谷划定了两条平行的城市发展轴线，建设了几座新城。

在 20 世纪 80 年代之后法国政府进行规划修编而颁布的《法兰西岛地区发展指导纲要 (1900-2015)》简称 SDRIF 规划，特别强调了对自然环境和文化遗产的保护，以取得自然环境和人文环境的平衡发展，并且将文化建设视为提高区域竞争力的重要途径。直到 2007 年，法国总统萨科齐颁布了对巴黎地区的改造计划“大巴黎计划”，此计划以可持续发展、交通网络重组等为主题，旨在改善巴黎郊区旧有依赖私人小汽车的出行方式，提高郊区内部通勤效率，最终达到节能减排的目的。

之后，在对于巴黎地铁网络的演变发展的分析中，我们也可以看到巴黎市在地铁线路规划上面的一些思路。例如，在 1900 年巴黎地铁建设开始之前的曾有多多个规划方案之间的讨论，是为了确定巴黎地铁将要服务的主要是城市内部的交通需求，还是在于连接各个大型火车站，以便利于更大区域内的出行需求。在之后的 1900 年到 1910 年之间，巴黎地铁建设的第一个十年间已经建成了巴黎地铁网络雏形，其中包括了两条半环形线路，两条沿着塞纳河方向以及垂直于塞纳河方向的直径穿越型线路。在这些线路的建设过程当中，地铁选线的方案也同时在经过不断的讨论和比较，例如南 2 号线最终成为 5 号线的一部分，而 5 号线在短暂服务 Gare de Lyon 火车站之后又转而放弃该站点，而向北延伸至 Gare du Nord 站。在 1910 年直到 1914 年第一次世界大战爆发之前，巴黎地铁网络出现的新线路主要是由 Jean-Baptiste Berlier 所创建的巴黎北南地下电气铁路公司 (Compagnie du Chemin de Fer Electrique Nord-Sud) 所建设的 A 线和 B 线，即今天巴黎地铁网络中的 12 号线和 13 号线。之后在第一次世界大战的影响之下，使得巴黎的生活水平提高，而城市居民不断地向巴黎周边迁移，从而加强了城市郊区与城市中心之间的通勤需求。巴黎都会地铁公司 (CMP) 着手了多条线路的建设，包括 7 号线、8 号线、9 号线、10 号线、11 号线和 12 号线等。其中 10 号线的选线规划经历了多番讨论，最终建成的线路客流量仍然不理想。在第一次世界大战之后的 10 年间，巴黎地铁的建设工作主要集中在地铁线路向郊区的延伸。

在前 40 年的初期建设完成之后，巴黎地铁网络进入了一个相对缓慢的发展时期，二次世界大战之后迎来的是私人小汽车的热潮，政府也顺应着人们“现代化”的心声，而鼓励着私人交通的发展。而到了 20 世纪后半叶，巴黎地铁进入了发展的保守期。不过，当地铁向巴黎郊区延伸之后，引进了新的交通流，最终地铁已不再能满足人们的

需求。巴黎大众运输公司（RATP）和法国国营铁路公司（SNCF）开始联合修建区域快轨 RER 的线路。

巴黎的城市公共交通体系非常的完善，包括了公汽、地铁、轻轨、城际快轨 RER，远程快轨 Transilien 等多种交通出行模式，而在本研究中，我们的主要研究对象是巴黎的地铁网络，其中包括 303 个地铁和 16 条地铁线路（包括 3bis 和 7bis 两条支线）。同时，在个别有关交通流量的研究中我们将也会考虑到城际快轨 RER 对地铁的客流量可能会产生的影响。本论文中分析以及作图所用的交通相关 GIS 数据主要基于巴黎大众运输公司（RATP）的开放数据所创建，而有关巴黎市相关 GIS 数据则主要来自于法国国家地理中心（IGN）的 BDTPOPO 数据。

经过本章中对巴黎地铁发展演变过程的梳理，我们对其地铁规划建设过程有了一个定性的分析，在下一章中，我们将具体选取巴黎地铁发展中几个重要的改动作为案例，并且将对地铁网络改动之前和之后分别做一个定量的分析，以研究这些改动对于地铁网络中的站点的中心度以及整体地铁网络的换乘效率将有怎样的影响。



## 4 对巴黎地铁网络演变分析

### 4.1 巴黎地铁网络发展中的几次改动

巴黎是世界上最早拥有的地铁网络的城市之一（在伦敦，纽约和布达佩斯之后）。在其进行地铁建设的十九世纪九十年代，关于地铁网络规划设计的世界经验和知识还是相当有限的，相关的理论和技术还有待发展。因此，当时的规划师和工程师很难能够一次性将整个地铁网络提前规划出来。

表 4.1 规划与现实的比较：1914 年以前的地铁线路

地铁线	规划	现实	差别的原因
原南 2 号线 现为 6 号线	应该延伸到 Nation 站。	- 转而延伸到 Gare du Nord 站； - 未来的 6 号线延伸至 Nation 站。	预计 Place d' Italie 站及 Nation 站之间的交通流量较小。
5 号线	该线路不经过 Gare de Lyon。	直至 1906 年 9 月的几个月间，Gare de Lyon 站与 5 号线通过一个特殊的连接相连。	Gare de Lyon 是巴黎几个车站中交通量最大的站点之一。
4 号线	一小段线路将从法兰西学院之下穿过塞纳河。	此线路被改为从更东边的 Châtelet 广场和西提岛之下穿过。	- 法兰西学院的反对； - 新的线路与交通流量的一致性更高。

根据可查的历史文献资料记载，巴黎地铁网络的规划是在其建设之前及过程中不断完善和调整的。同时，在地铁网络的规划和发展建设过程当中，经历了多次的线路改动（见表 4.1），包括不同线路之间的合并以及轨道的交换。

如表 4.1 中所示，如今的巴黎地铁 6 号线在规划中原为南 2 号线，预计将由 Etoile 站延伸至 Nation 站，但由于在建设之初，Place d'Italie 站到 Nation 站之间的线路交通流量较小，因此该线路由 Place d'Italie 站转而向北与 5 号线连接延伸至 Gare du Nord 站，并在此后三十多年的时间作为巴黎地铁网络中最长的线路运营至 1942 年，才最终调整为了原规划中的南 2 号线，即如今的地铁 6 号线的形态。

这些线路改动的实例说明巴黎的发展是一种“有机”的方式进行的：在发展过程中通过适应需求而进行地铁网络的改善。因此，观察和研究在巴黎地铁网络的发展演变，并且理解其发展过程中的线路变化对整个地铁网络系统的影响，是十分重要的。

通过对巴黎地铁有关历史资料的收集，我们找出了巴黎地铁网络发展过程中，对网络结构有显著影响的四次改动。在本章中，我们首先将对所选的四个案例中地铁网络改动的具体情况进行描述，并分析发生线路改变的历史背景及主要原因。为了理解这些改动对整个地铁网络的影响，我们将其分为改变之前（阶段 A）和改变之后（阶段 B）两个部分。之后，我们将对两个不同阶段的地铁网络进行中心度分析，并对其中中心度的分析结果进行比较。

#### 4.1.1 案例一（1910 年的 4 号线）：Chatelet 和 Raspail 地铁站的接合

在巴黎地铁网络建设的初始阶段，为了让它能够既服务到火车站 Montparnasse 又服务到城市中心的 Chatelet 站和 les Halles 站，巴黎的工程师们对 4 号线穿过巴黎的路线选择进行了多次的修改。由于这是巴黎地铁网络中第一条南北向的线路，又从巴黎中心区穿过，因此必然要穿过塞纳河。虽然此前已有不同线路三次穿过塞纳河而建，但这是巴黎历史上首次从塞纳河底穿过的线路，其建设难度可想而知。

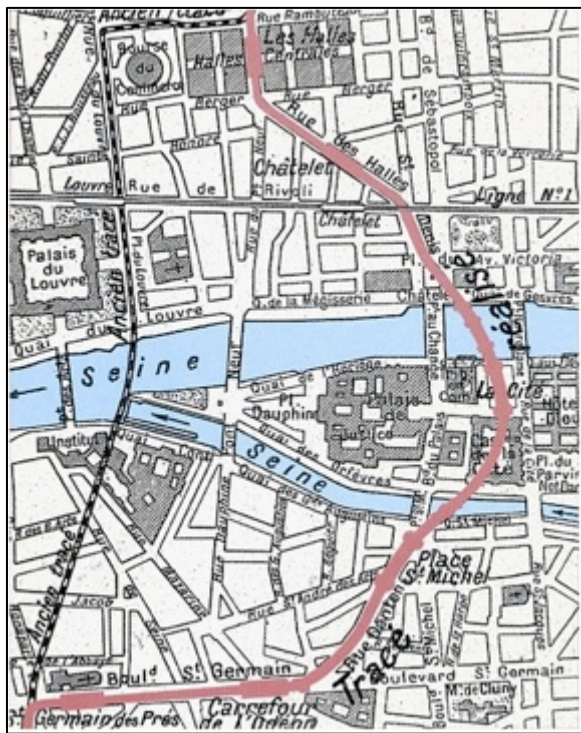


图 4.1 地铁 4 号线本来的线路（图左黑色虚线）及改动后的线路（图右红色实线）（©AMTUIR）

与此同时，巴黎都会地铁公司（CMP）还遇到一个别的难题：原本 4 号线的选线由于要从法兰西学会（Institut de France）地下穿过，而遭到该机构学者们的强烈反对。于是，为了不要因此推迟 4 号线的施工，同时也是为了满足大多数巴黎人的希望，巴黎都会地铁公司于是将选线向东迁移，在 Châtelet 站之后，将穿过西提岛（l'île de la Cité），进而穿过 Saint-Michel 广场以及拉丁区。由于是巴黎首次进行类似的工程施工，包括 Halles 路及 Saint-Germain 大道之间相距 1100 米的地铁线路及两个地铁站的修建，还专门为此进行了各种不同可能方案的研究（图 4.1）。

4 号线的施工不易之处也还是当时的路网施工迟缓造成的。由于 4 号线的选线沿着某些道路进行，例如 Rennes 路的延伸扩建并没有按照计划进行，取而代之的是 Rennes 路以及 Montparnasse 大道之间的 Raspail 大道。因此 4 号线最终改道沿着 Rennes 路原本的路线一直到 Montparnasse 火车站，然后沿着 Raspail 大道，最后再转向 Montparnasse 大道。这也是如今的巴黎地铁 4 号线的选线特别“蜿蜒曲折”的

原因。

在研究案例一中，阶段 A 是 1909 年 10 月 30 日的巴黎地铁网络，而阶段 B 是 1910 年 1 月 9 日的地铁网络（见图 4.2）。1908 年 4 月 21 日，4 号线北段 Clignancourt-Châtelet 的部分首先开放运营，随后 1909 年 10 月 30 日，其南段 Raspail-Porte d'Orleans 也开放运营了。最后在 1910 年 1 月 9 日，整条线路的南北两段实现了成功连接（在 Châtelet 站），4 号线是第一条从河底穿过塞纳河的线路。这里选择 4 号线南北段相连接的案例是为了观察这样的一次地铁网络上不同线路上的连接对地铁网络整体而言将会产生怎样的影响。

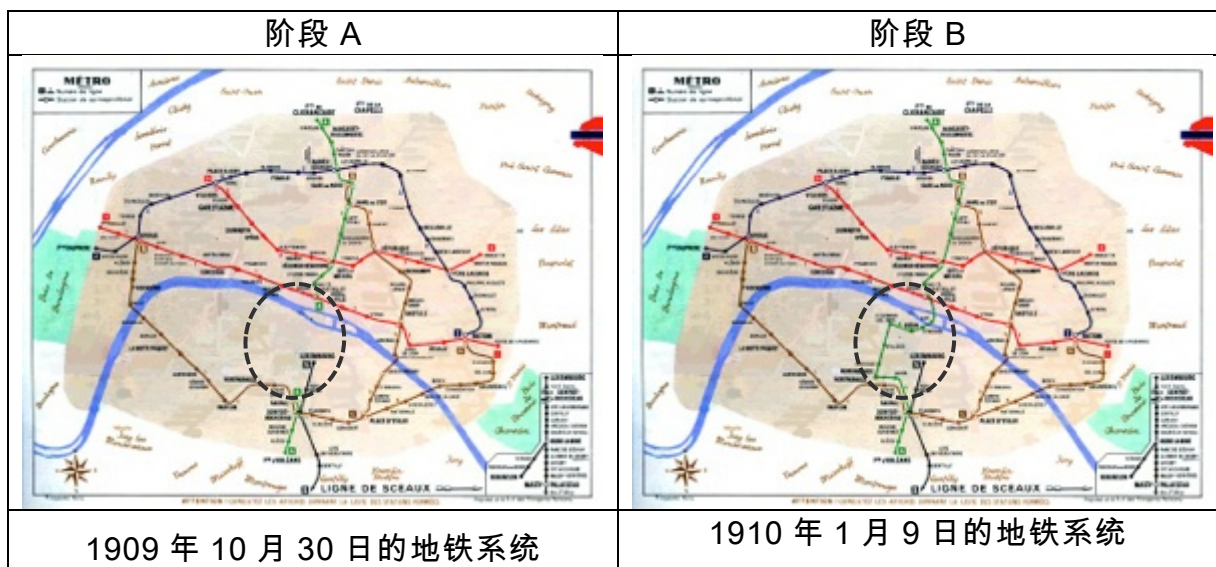


图 4.2 案例一中的阶段 A 和阶段 B (©AMTUIR)

#### 4.1.2 案例二（1931 年的 7 号与 10 号线）：7 号线的延伸以及对 10 号线轨道的整合

当初，在 7 号线塞纳河右岸的部分修建完成至 Châtelet 站之后，关于这条线路接下来的走向还有许多不同的方案在讨论当中。最初，有设计方案认为 7 号线应该继续延伸至 Bastille 站，有的则认为它应该连接 Porte d'Italie 站和 Porte de Choisy 站，还有的认为它应该与 10 号线的前身——所谓的“内环线”相连接并且沿着 Saint-Germain 大道连接到 Odéon 站。然而，1919 年巴黎市政府的一个参赞提出了这些规划的改良方案。他提出巴黎五区和十三区的居民更有可能去巴黎市中心，因此最终提出将合并 7 号线与“内环线”10 号线的部分线路，并且将又一次连接塞纳河的左岸和右岸。



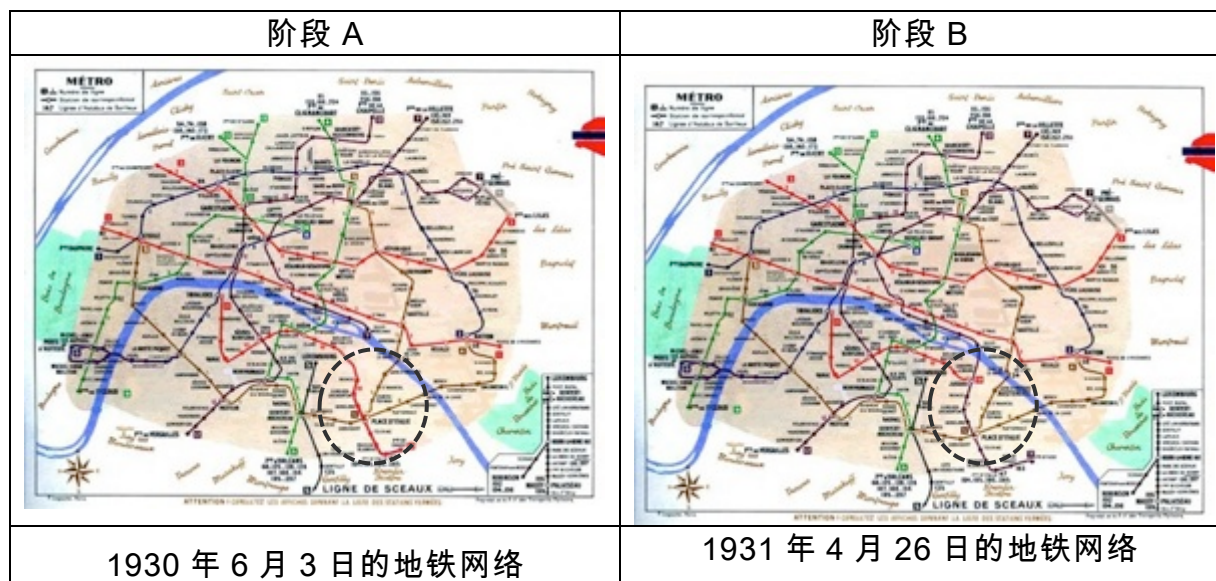


图 4.3 案例二中的阶段 A 和阶段 B ( ©AMTUIR )

1930 年 2 月 15 日，Place d'Italie 到 Place de Monge 站之间的线路已经作为 10 号线开通运营了，并且之后在同年 3 月 7 日又延伸到了 Porte de Choisy 站。但是该条线路的选线并不十分令人满意，由于与交通流向不符而导致客流量非常少。因此，工程师们决定要将该段地铁线路并入 7 号线。7 号线本来在 1930 年 6 月 3 日继续了 Pont Marie 站及 Sully-Morland 站之间的延伸。接下来，7 号线成功建设穿过塞纳河底并到达 Jussieu 站。而新建的地铁站 Jussieu 成为了 7 号线和 10 号线的换乘站。10 号线上从 Jussieu 站到 Porte de Choisy 站部分的地铁线路被纳入了 7 号线的使用。自此，7 号线延伸到了 Porte de Choisy 站，而 10 号线则放弃了 Marbert-Porte de Choisy 段线路而通往了 Jussieu 站。

如图 4.3 所示，阶段 A 为 1930 年 6 月 3 日改动实施前的巴黎地铁网络，而阶段 B 为 1931 年 4 月 26 日改动实施后的地铁网络。在这个案例中我们将分析当 7 号线与 10 号线的部分线路合并之后，对整个地铁网络会有怎样的变化。像这样线路之间的合并是在巴黎地铁历史演变的过程中也是比较具有代表性的。

#### 4.1.3 案例三（1937 年的 8 号、10 号及 14 号线）：地铁线路间的转换

1930 年代，横贯巴黎的轴线地铁线逐渐取代了环形线路成为了地铁网络运行中的主导线路，8 号线也逐渐失去了它连接巴黎西边的 Boulogne 森林和巴黎东边的 Vincennes 森林的主要目标。10 号线在 Invalides 站和 Jussieu 站之间的线路运营了六年，直到 1937 年，该线路上始终没有足够的交通客流量。另外，巴黎还有建设 14 号线（如今为 13 号线）的计划。出于这些考虑 1932 年 12 月 9 日，巴黎议会决定对这些线路进行一定程度的延伸和重组，这些改动也造就了今天巴黎地铁的 8 号线、

10 号线以及 13 号线的最终形态（当时为 14 号线）。这三条线路之间的具体改动如下：

- 8 号线从 Motte - Picquet - Grenelle 站通往 Place Balard 站而不是原来的 Porte d’Auteuil 站；
- 14 号（原北南公司的 C 线规划）启用 10 号线上的 Duroc 站到 Invalides 站之间的路段并建成 Invalides 站 - Porte de Vanves 站线路，即今天的 13 号线的部分线路。
- 同时，10 号线上两端剩余的线路 Auteuil 站 - La Motte-Picquet-Grenelle 站以及 Jussieu 站 - Duroc 站将由一段新建的线路 Duroc 站 - La Motte-Picquet 站所连接进而构成今天 10 号线的一部分。在之后的几个月中，理事会最终决定要扩建 10 号线至 Gare d’Austerlitz 站。

当时，8 号线、10 号线和 14 号线的整改在 1937 年 7 月 26、27 日晚上的夜间进行。新的 10 号线直到两天后的 29 号才开通运营。地铁公司安排专人向乘客们散布线路改动的讯息以方便乘客改变出行计划。

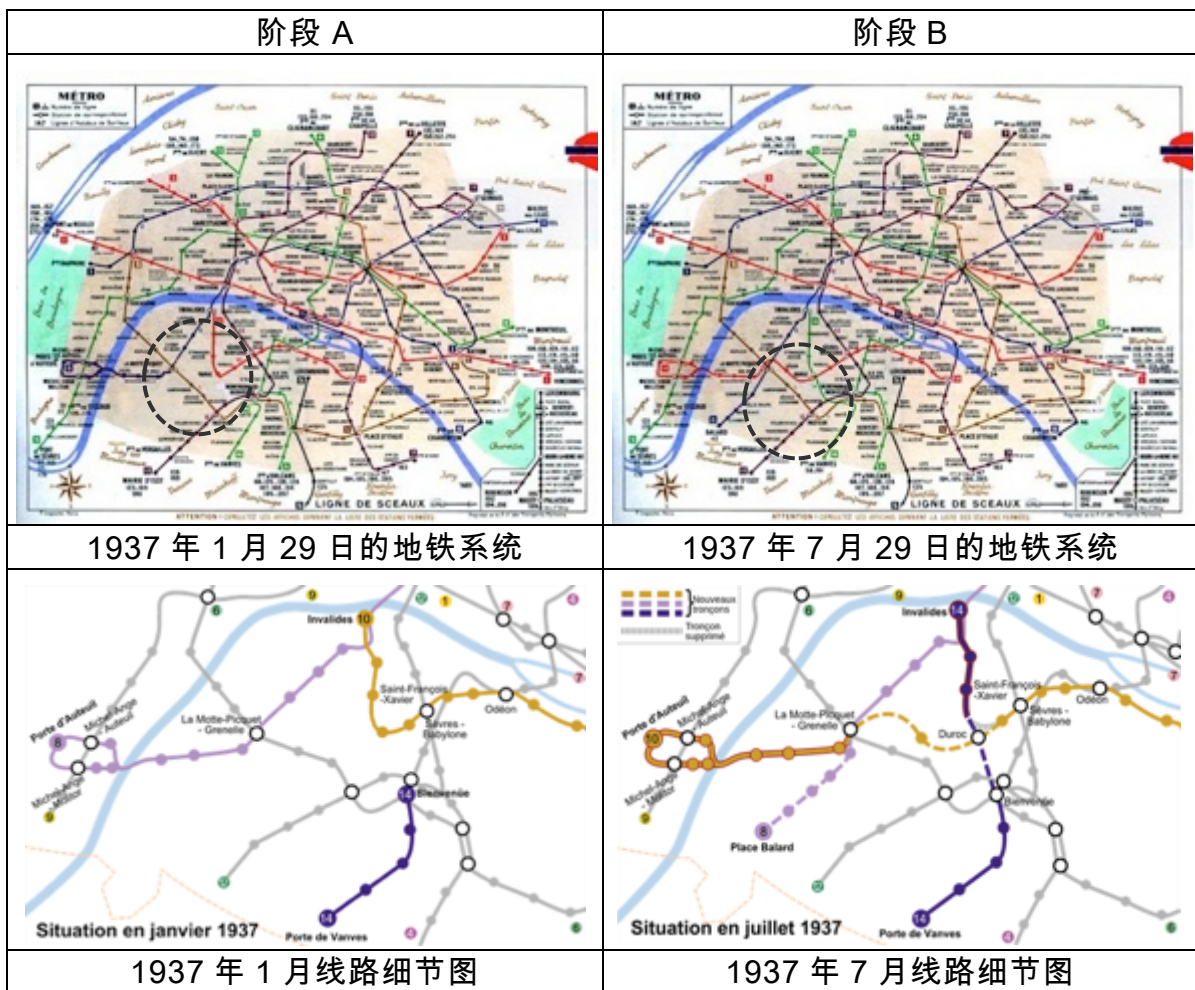


图 4.4 案例三中的阶段 A 和阶段 B ( ©AMTUIR & Wikipedia )

如图 4.4 所示，阶段 A 为 1937 年 1 月 29 日改动实施前的巴黎地铁网络，而阶段 B 为 1937 年 7 月 29 日改动实施后的地铁网络。在图 4.4 下部的细节图中，我们可以更清楚的看到几条线路之间的改变，图中浅紫色线路为 8 号线，黄色线路为 10 号线，而深紫色线路为 14 号线（现为 13 号线）。该案例是巴黎地铁发展演变中线路改动最大，也最为复杂的一次，涉及了三条地铁线路。在对该案例的分析中，我们可以观察到此次大的改动对整体地铁网络的影响。

#### 4.1.4 案例四（1942 年的 5 号与 6 号线）：5 号线的一段被归入 6 号线中

巴黎地铁今天的 6 号线是分几个不同阶段在不同时间开通运营的。首先 Étoile 站 - Trocadéro 站之间是 1900 年首先开放运营的线路。三年之后，1903 年 11 月 5 日，这条线路延伸至 Passy 站，也就是跨越塞纳河之前的最后一站。但是在当时这条线路被称为 2 号环线的南线部分。在 1906 年 4 月 24 日，它被延伸直到 Place d'Italie 站。1907 年 10 月，该线路的 Passy 站 - Place d'Italie 站部分与 5 号线合并，从此“2 号南线”这条线路的名称就不再存在了，而 5 号线在后来的 30 年中成为了地铁网络中最长的线路之一。

最初开始被称为 6 号线的线路实际上是从 Place d'Italie 站到 Nation 站的部分。自从 1906 年，施工建设完成之后，巴黎都会地铁公司（CMP）迟迟不愿开放这条线路的运营，主要是由于这段线路所穿过的区域在当时比较欠发展，并且预测到该线路上的交通需求有限。而且根据 1901 年的规划，地铁 2 号线南线将与 6 号线的这部分线路相连接，而形成完整的南半环线，也由于这个原因而没有实施。直到 1909 年 3 月 1 日，在巴黎市政府的坚持下，巴黎都会地铁公司（CMP）才终于向公众开放运营了地铁 6 号线。

在许多年中，6 号线一直局限于 Place d'Italie 站 - Nation 站之间的运营（仅十个站点）。但由于 2 号南线和 5 号线的终点站都在 Place d'Italie 站，对实际运营的压力十分大。而 1931 年在 Vincennes 森林举行的博览会最终促使了这条线路的改动。当时主要由 8 号线为博览会的顺利举行服务，而 8 号线与当时的短 6 号线在 Daumesnil 站有换乘。为了能够让更多的参观者能够通过换乘 6 号线被分散到巴黎南部的各个角落，最终巴黎都会地铁公司（CMP）决定将 6 号线借用 5 号线的轨道进而延伸至 Étoile 站。而五号线则缩短运营线路为 Gare du Nord 站 - Place d'Italie 站，而 6 号线则为 Nation 站 - Étoile 站。待博览会结束之后，两条线路又恢复了原来的面貌并以此模式运营了 11 年之久。

直到 1942 年，为了满足日益增加的交通需求，巴黎市对多条地铁线路进行了延伸。其中 5 号线延伸至 Eglise de Pantin 站，在此之后 5 号线和 6 号线之间的转换才真正得以实施：5 号线由 Eglise de Pantin 站通往 Place d'Italie 站，而由 6 号线将



Etoile 站到 Place d'Italie 站之间的路径整合进来并一直通往 Nation 站，从而使 6 号线形成一个南部的半环线，而 5 号线则成为了垂直的切线型线路。

如图 4.5 所示，阶段 A 为 1942 年 10 月 5 日改动实施前的巴黎地铁网络，而阶段 B 为 1942 年 10 月 12 日改动实施后的地铁网络。这次改动应该来说对巴黎地铁网络的结构都有所改变。在此案例中，我们将研究分析像这样大的线路间的改动将会对整体地铁网络产生怎样的影响。

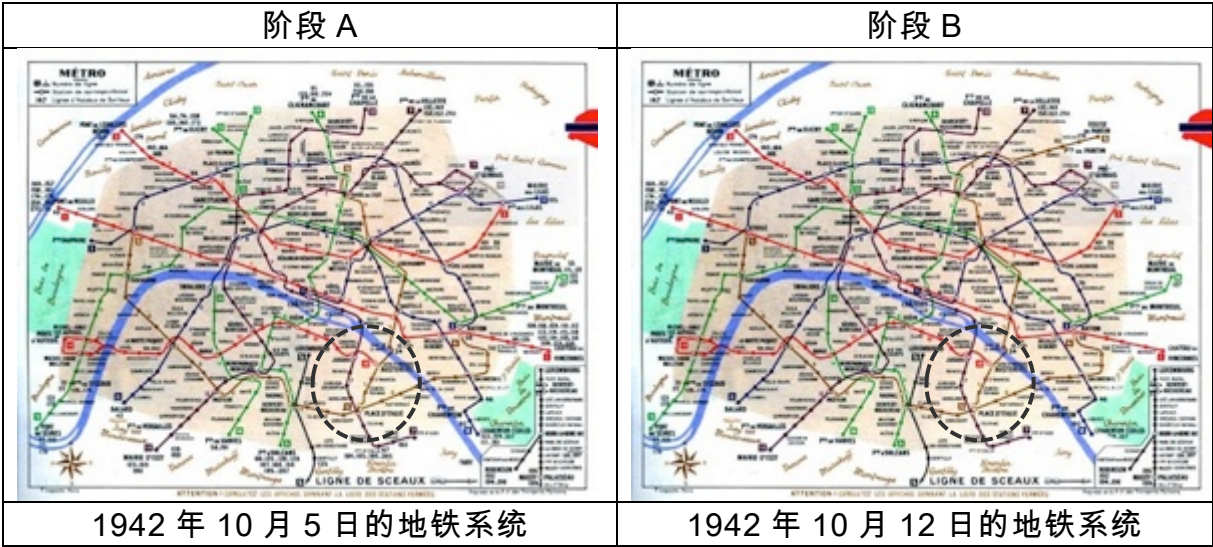


图 4.5 案例四中的阶段 A 和阶段 B ( ©AMTUIR )

### 4.2 案例一的中心度分析

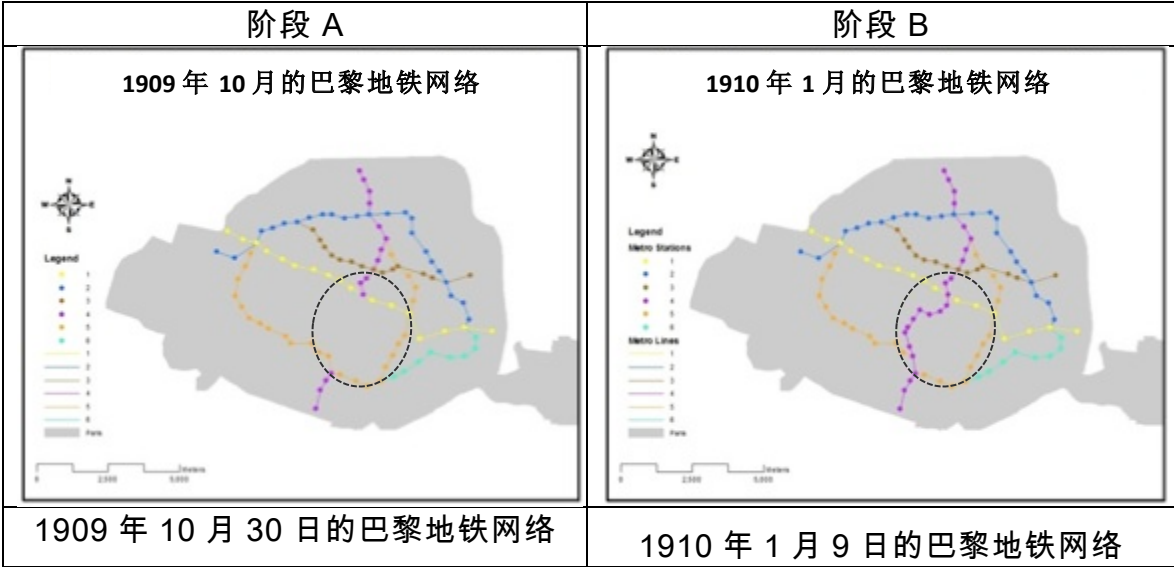


图 4.6 案例一中巴黎地铁网络的阶段 A 和阶段 B  
( 数据来源 RATP Open Data & AMTUIR , ©王曦 )

在研究案例一中，阶段 A 是 1909 年 10 月 30 日的巴黎地铁网络，而阶段 B 是 1910 年 1 月 9 日的地铁网络（见图 4.6）。网络的变化之处在地铁 4 号线上：该线路的南北两段在 Chatelet 站和 Raspail 站之间的部分被连接起来了。这是首条穿过塞纳河底，连接巴黎左岸及右岸的地铁线路。

如图 4.7 所示为案例一的阶段 A 中，巴黎地铁站点的中心度分析结果。在阶段 A 中，5 号线上的非换乘站中心度最高，其次是 2 号线。这两条线路的连接度都比较高——它们与其它所有的线路都有直接换乘。而这两条线路与 1 号线的换乘站 Etoile 在整个地铁网络中拥有最高的中心度。其次是 1 号线上的另外两个换乘站：Bastille 站和 Nation 站。中心度最低的非换乘站点主要分布在地铁 6 号线上，它只与两条线路有直接换乘。

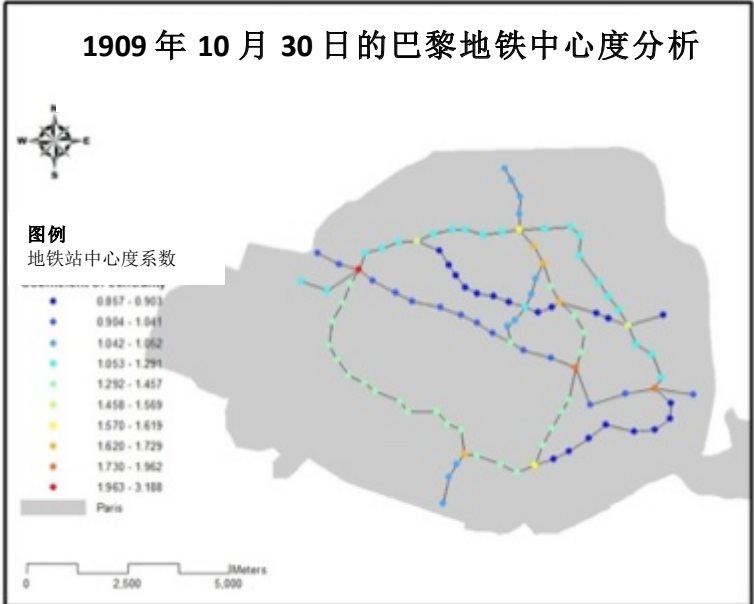


图 4.7 1909 年 10 月 30 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

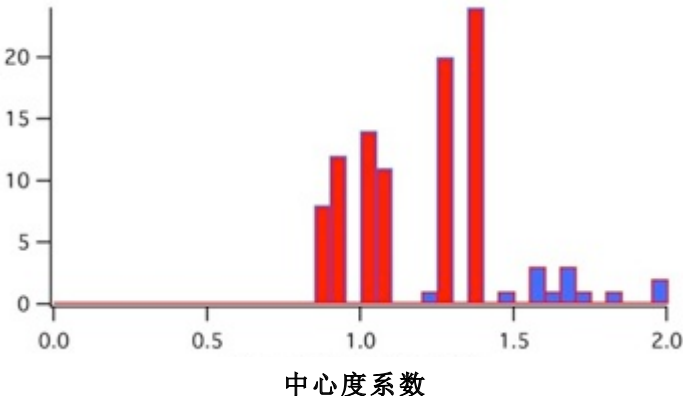


图 4.8 1909 年 10 月 30 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

如图 4.8 所示为阶段 A 的地铁站点的中心度系数直方图。其中红色的为非换乘站的中心度系数，蓝色的为换乘站点的中心度系数。在此分析结果中，我们仍然可以观察到的是换乘站的中心度普遍比非换乘站的中心度要高一些。而整个地铁网络的换乘效率值计算结果 Eff 为 1.170。

如图 4.9 所示，为巴黎地铁案例一的阶段 B 中的中心度分析结果。在阶段 B 中，除了中心度最高的 Etoile 站以及 1 号线上的其它换乘站点拥有较高的中心度系数值以外，4 号线与 5 号线的另外四个换乘站：Gare du Nord 站，Gare de l'Est 站，Raspail 站和 Denfert-Rochereau 站比阶段 A 中的中心度要明显提高了。这四个换乘站中有两个是火车站（Gare du Nord 站和 Gare de l'Est 站）。该分析结果表明了在 4 号线的南北端相连接之后，巴黎的两个主要的火车站相比之前得到了更好的服务。其它换乘站点的中心度也得到了相对提高。而 4 号线上的非换乘站的中心度也得到了提高，中心度最高的线路仍然是地铁 2 号线及 5 号线。

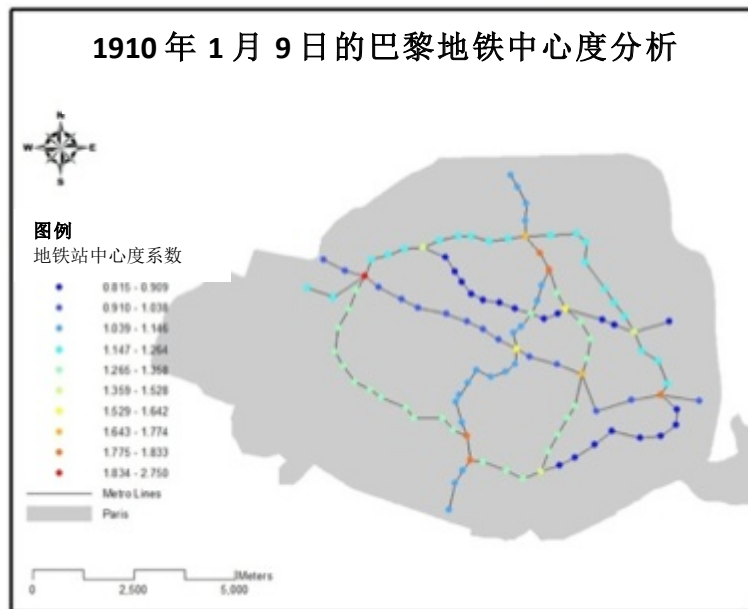


图 4.9 1910 年 1 月 9 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

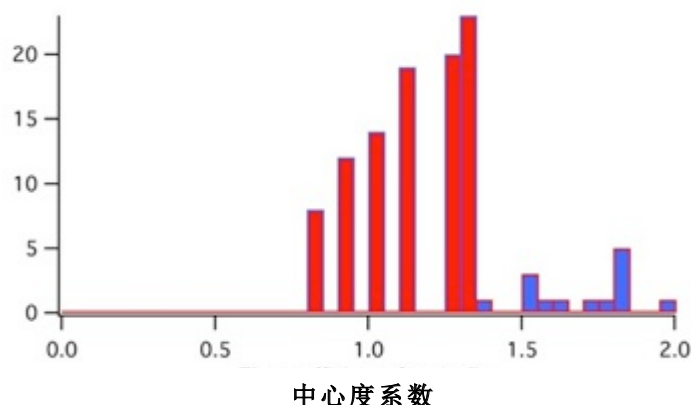


图 4.10 1910 年 1 月 9 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

图 4.10 为案例一阶段 B 的地铁站点中心度系数直方图，从图中可以看出换乘站点的中心度仍然高于非换乘站，同时相比阶段 A 而言，某些换乘站点的中心度也得到了提高。地铁网络的换乘效率值 Eff 计算结果为 1.167。

在研究案例一中，地铁网络中的改动为 4 号线的南北两段在 Chatelet 站和 Raspail 站之间的部分被连接起来了。地铁站点的总数由 102 个增加到了 110 个，而换乘站点的数目仅增加了 1 个（由 13 个增加到 14 个）。在该案例的研究中，虽然地铁网络的连接度有所增强，但是阶段 B 的地铁网络效率却略微有所下降（由 1.170 降到 1.167）。由此可见增加换乘站点的个数可以增加地铁网络效率，但同时也应该考虑到非换乘站数量的增加也会使地铁网络的效率系数降低。而从局部上来观察，4 号线上南北端的连接使中心度从地铁网络的环线转移到了城市中心的垂直线上。它同时也加强了换乘站点的中心度，特别是 4 号线和 5 号线上新建的换乘站点。

### 4.3 案例二的中心度分析

在研究案例二中，阶段 A 为 1930 年 6 月 3 日改动实施前的地铁系统，而阶段 B 为 1931 年 4 月 26 日改动实施后的地铁系统（如图 4.11）。该案例中地铁网络的变化之处在于：10 号线上从 Jussieu 站到 Porte de Choisy 站部分的地铁线路被纳入了 7 号线路。改动之后，7 号线成为了贯穿南北的直线穿越型地铁线，而 10 号线则是位于巴黎左岸的切线型线路。

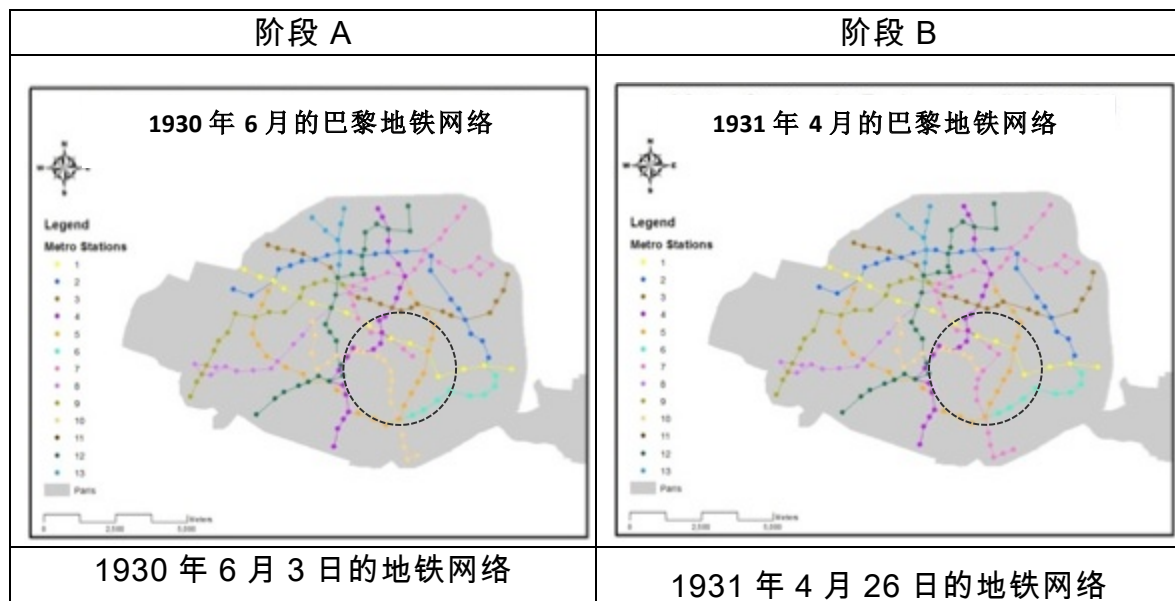


图 4.11 案例二中地铁系统的阶段 A 和阶段 B  
( 数据来源 RATP Open Data & AMTUIR , ©王曦 )

如图 4.12 中的分析图所示，在阶段 A 中，中心度最高的 4 个换乘站点（红色站点）依次为 Gare de l'Est 站、Charles de Gaulle-Etoile 站、Châtelet 站和 Montparnasse-Bienvenue 站。这些站点均为多条地铁线路的中转站，同时其中 Gare de l'Est 站和 Montparnasse-Bienvenue 站是巴黎的火车站。中心度较高的这些换乘站点主要分布在 4 号线上。一般来说，换乘站点的中心度比非换乘站要高。而 5 号线上的非换乘站有较高的中心度（绿色站点）。6 号线、10 号线、9 号线以及 13 号线上的非换乘站中心度相对来说比较低。从图 4.13 的中心度系数直方图中可以看出，换乘站（蓝色）的中心度普遍高于非换乘站（红色），该地铁网络的换乘效率值 Eff 计算结果为 0.855。

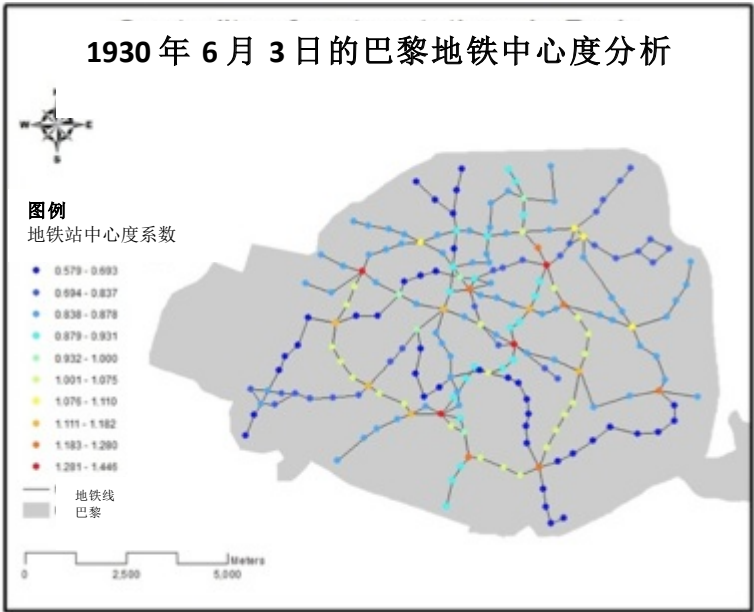


图 4.12 1930 年 6 月 3 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

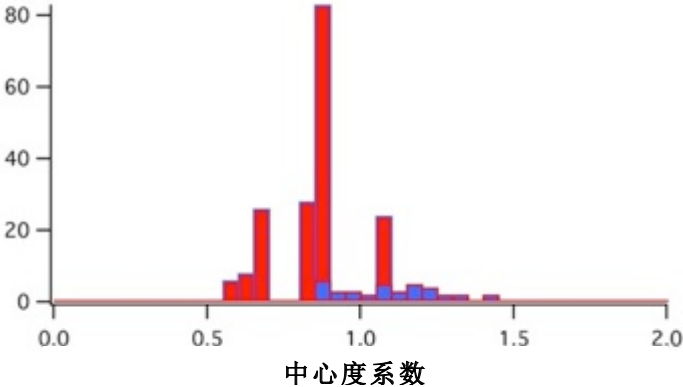


图 4.13 1930 年 6 月 3 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)



在阶段 B 中（如图 4.14），7 号线上的非换乘站以及换乘站点的中心度均有显著的提高。并且它成为了继 5 号线之后中心度最具优势的线路。然而从中心度分析结果来看，这次改动对 10 号线并没有很大的影响，其站点中心度仍然比较弱。其他的地铁线路的中心度也在这次改动后受到了一定程度的影响：例如 4 号线和 12 号线上的非换乘站的中心度有微弱的降低，而 2 号线上站点的中心度却有些许的提高。其它线路和非换乘站基本没有太大改变。如图 4.15 为巴黎地铁的中心度系数直方图，最后所得的地铁网络的换乘效率 Eff 为 0.882，相比阶段 A 来说有所提高。

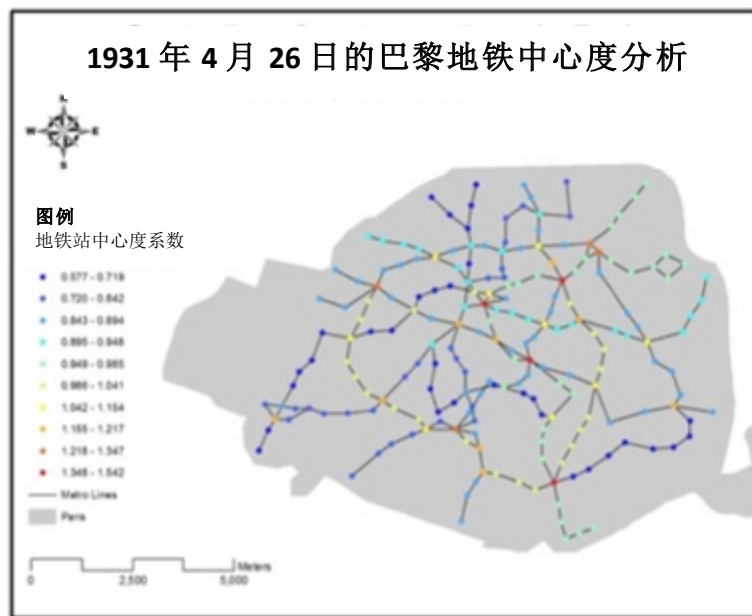


图 4.14 1931 年 4 月 26 日的巴黎地铁的中心度分析（©王曦）

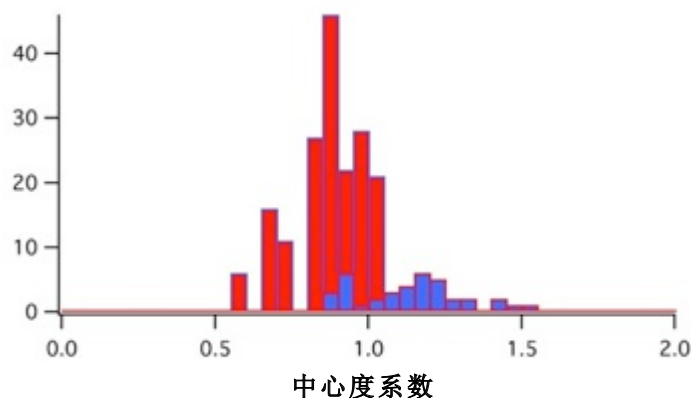


图 4.15 1931 年 4 月 26 日的巴黎地铁的中心度系数直方图（©王曦）  
（蓝色表示换乘站，红色为非换乘站）

在研究案例二中，地铁网络中的改动为 10 号线上从 Jussieu 站到 Porte de Choisy 站部分的地铁线路被纳入了 7 号线路。非换乘站的数量并没有增加，而换乘站点的数目则增加了一个。整体地铁网络的结构得到了很好的调整，一些换乘站在网络中的重要程度得到了加强。多条地铁线路上的站点的中心度得到了提高，特别



是 7 号线上的非换乘站和换乘站点。整体网络的换乘效率值  $Eff$  从 0.855 提高到了 0.882，由此可见此次改动对地铁网络的整体效率有着积极的影响。

#### 4.4 案例三的中心度分析

如图 4.16 所示，阶段 A 为 1937 年 1 月 29 日改动实施前的地铁系统，而阶段 B 为 1937 年 7 月 29 日改动实施后的地铁系统。在该表格的细节图中，可以更清楚的看到几条线路之间的改变。此案例中的改动是巴黎发展史上规模比较大的一次，涉及到了三条地铁线路。做出线路重组之后，Balard 为 8 号线的新的终点站，原 8 号线 La Motte-Picquet 和 Porte d'Auteuil 的部分被转让给了 10 号线。之前，10 号线的终点站为 Invalides，Duroc 站和 Invalides 站之间的部分在重组之后被纳入 14 号线（如今的 13 号线）。

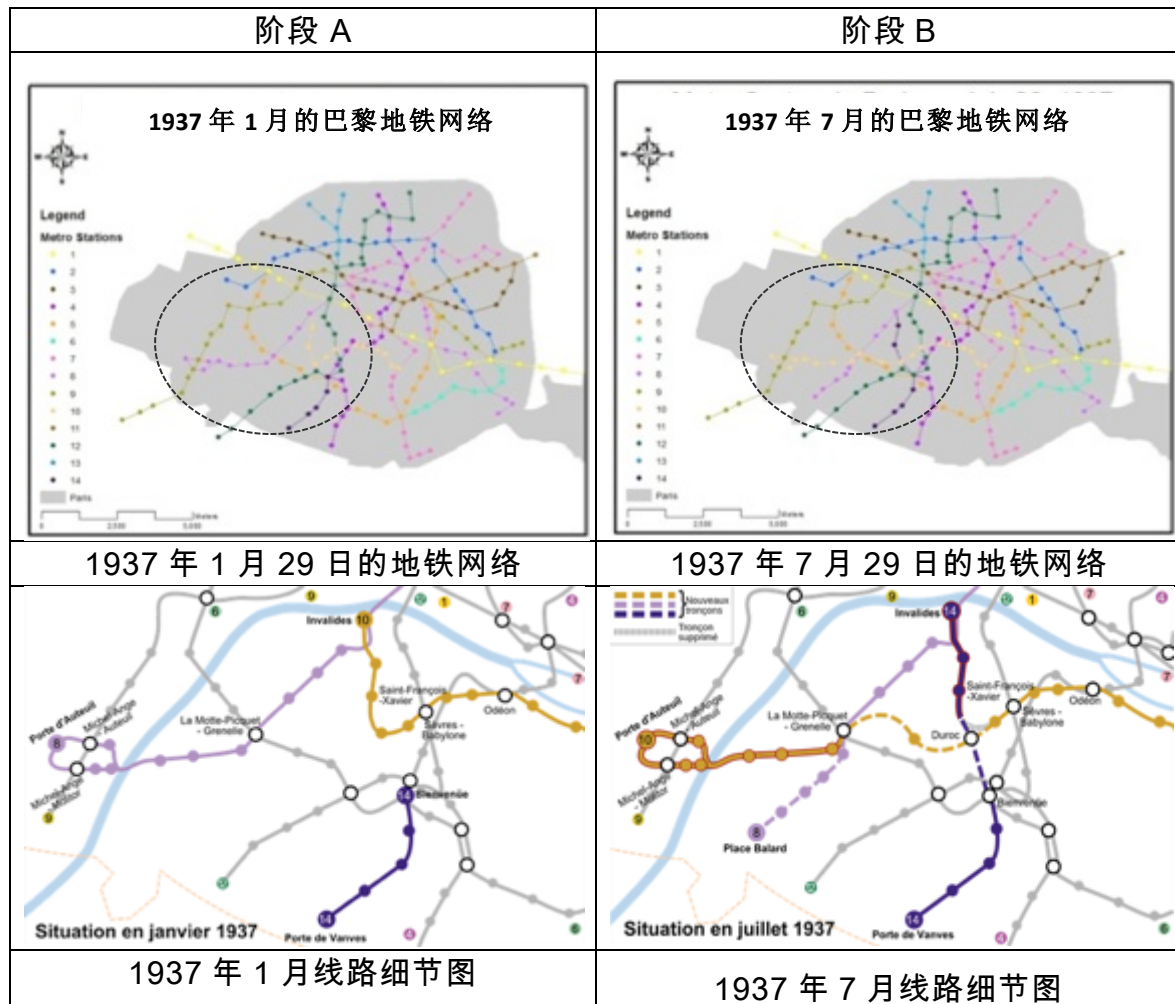


图 4.16 案例三中地铁系统的阶段 A 和阶段 B  
(数据来源 RATP Open Data & AMTUIR, ©王曦)

如图 4.17 所示，在阶段 A 中，中心度最高区间的站点只有一个，为换乘站 **Republique**，在其次第二和第三区间中（橙色系）的站点也均为换乘站。中心度最高的非换乘站主要分布在 4 号线和 5 号线上。中心度最低的站点则为 10 号线、13 号线以及 14 号线（如今的 13 号线南段）上的非换乘站。如图 4.18 所示，为巴黎地铁的中心度系数直方图，从图上可看到换乘站点的中心度系数比非换乘站的中心度系数要高，该地铁网络最后计算的换乘效率值  $Eff$  为 0.850。

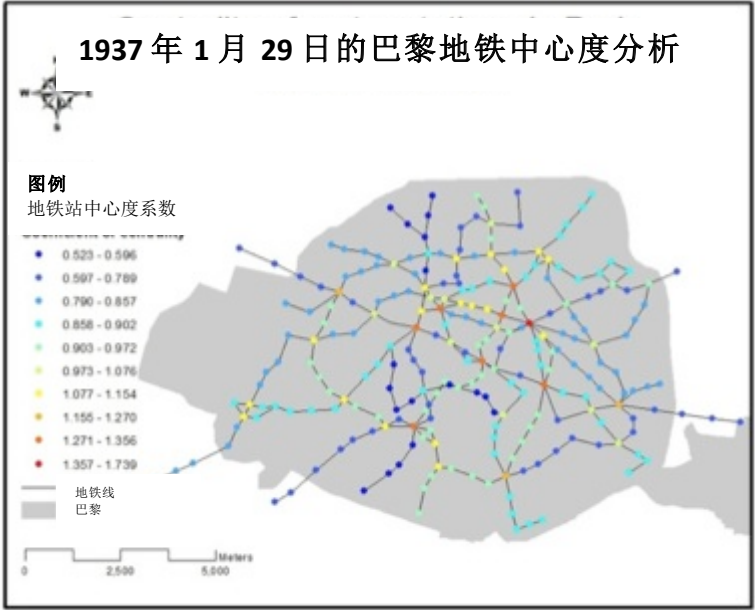


图 4.17 1937 年 1 月 29 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

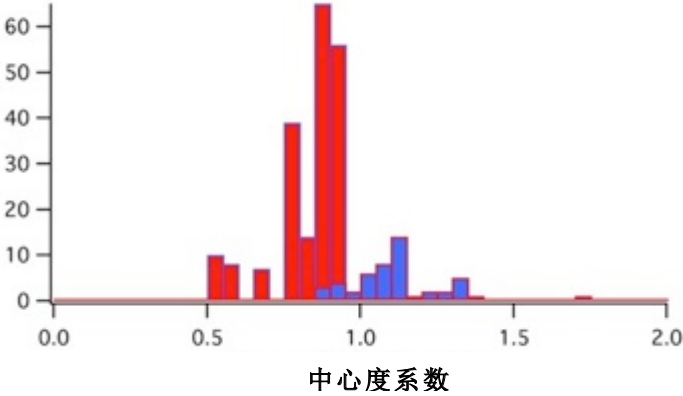


图 4.18 1937 年 1 月 29 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

在阶段 B 中，中心度最高的仍为 **Republique** 站，而第二及第三区间的中心度站点数增加一倍（如图 4.19），这说明此次改动增加了中心度较高的换乘站的数量，特别是在南半环线上的几个换乘站的中心度得到了提高。虽然 10 号线及 14 号线上地铁站点的中心度仍然薄弱，但 10 号线上的中心度有些许的增强。9 号线上地铁站点的中心度与改动之前相比得到了显著的提高。而 8 号线上的地铁站点的中心度却没

有很大的变化。其他地铁线路也受到了 8 号线、10 号线和 14 号线之前调整的影响：例如 4 号线上的非换乘站相比阶段 A 来说在整体网络中变得更为重要。如图 4.20 所示为巴黎地铁的中心度直方图，该地铁网络最后计算所得的换乘效率值  $Eff$  为 0.856，较改动之前的网络换乘效率值而言有略微的提高。

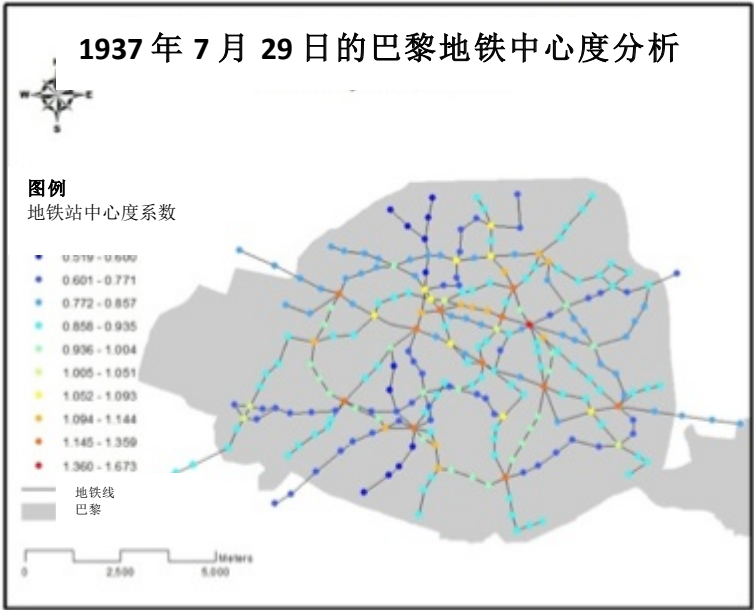


图 4.19 1937 年 7 月 29 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

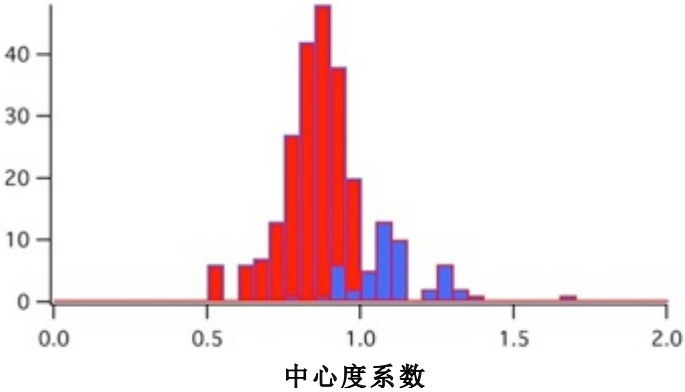


图 4.20 1937 年 7 月 29 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

在研究案例三中，地铁网络中的改动涉及到了三条地铁线路。做出线路重组之后，Balard 为 8 号线的新的终点站，原 8 号线 La Motte-Picquet 和 Porte d’Auteuil 的部分被转让给了 10 号线。之前，10 号线的终点站为 Invalides，Duroc 站和 Invalides 站之间的部分在重组之后被纳入 14 号线（如今的 13 号线）。地铁站总数从 240 个增加到 246 个，而换乘站点数只增加了一个。从中心度分析结果来看，这次大的改动有效的提高了多个换乘站点的中心度，特别是 5 号线、8 号线和 9 号线的换乘站点。这个改动不仅仅对重组的几条线路的路径有了更合理的设置——例如 10 号线的站点

服务范围比调整之前分布地要更为均衡，很好地服务了市郊与城市中心之间的通勤——同时，这次改动也提高了某些地铁线路，如地铁 9 号线在整个网络中的重要性。尽管如此，地铁网络的换乘效率值  $Eff$  并没有得到显著的提高，仅从阶段 A 中的 0.850 提高到了阶段 B 中的 0.856。

### 4.5 案例四的中心度分析

如图 4.21 所示，阶段 A 为 1942 年 10 月 5 日改动实施前的地铁系统，而阶段 B 为 1942 年 10 月 12 日改动实施后的地铁系统。改动之后，原 5 号线终止在 Place d’Italie 站，而由 6 号线整合了 Etoile 站到 Place d’Italie 站之间的路径，从而使 6 号线形成一个巴黎南部的半环线，而 5 号线则成为了垂直与塞纳河的切线型线路。

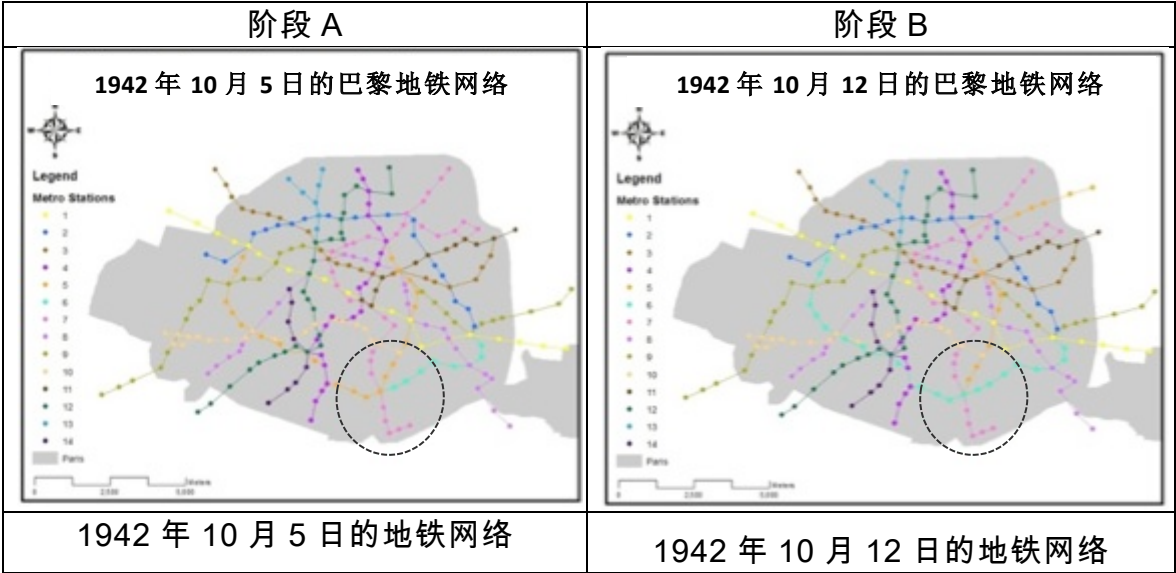


图 4.21 案例四中地铁系统的阶段 A 和阶段 B  
( 数据来源 RATP Open Data & AMTUIR , ©王曦 )

如图 4.22 所示，为阶段 A 中地铁网络的中心度分析结果。从图中可以看到，中心度较高的非换乘站主要分布在 5 号线上。这条线是整个地铁网络中最长的线路，并且它与许多其他地铁线路都有换乘。中心度最低的非换乘站主要分布在 13 号线和 14 号线上，而 6 号线的中心度也相对来说比较薄弱。在这个阶段的地铁网络中，即地铁 5 号线和 6 号线之间的改动发生之前，这两条地铁线的中心度相差是比较明显的。如图 4.23 所示为巴黎地铁的中心度系数直方图，该地铁网络的换乘效率  $Eff$  最终计算结果为 0.860。

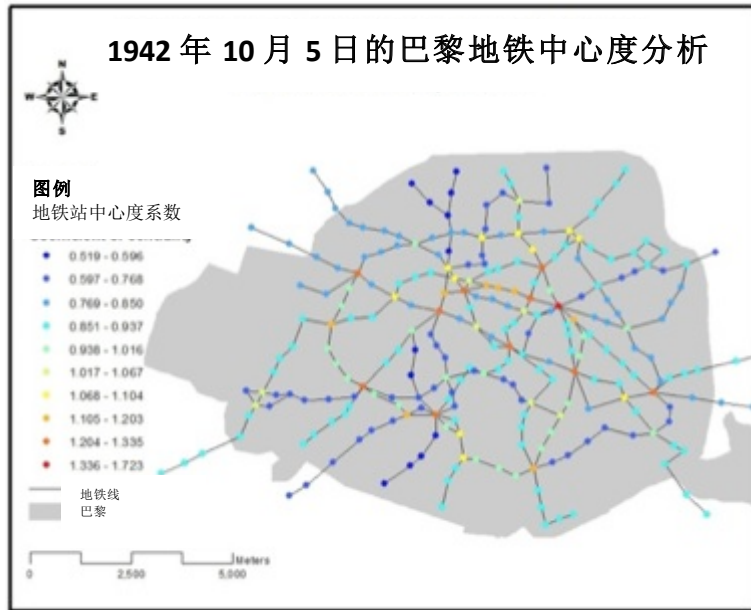


图 4.22 1942 年 10 月 5 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

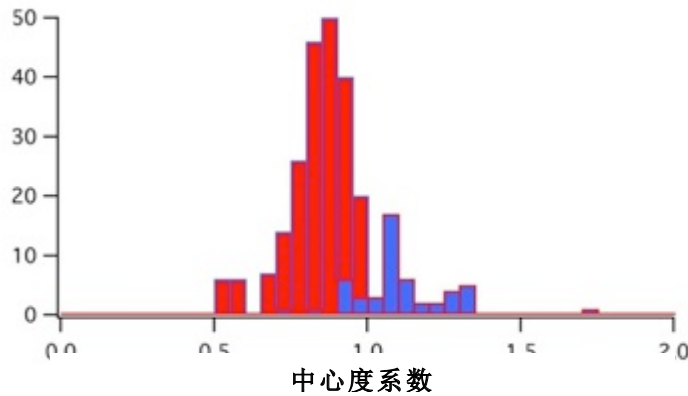


图 4.23 1942 年 10 月 5 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站, 红色为非换乘站)

在阶段 B 中, 在两条地铁线发生合并之后。中心度较高的三个层次的地铁站点并没有显著增加 (图 4.24)。在此阶段中, 经过路径的改变, 5 号线上非换乘站点的中心度下降了两级, 而 6 号线上非换乘站点的中心度增加了一级, 最终两条线路的中心度到达了同一层级。此时中心度最低的站点是 13 号线和 14 号线上的非换乘站。而除了 5 号线之外, 地铁网络中有多条地铁线的中心度有所下降, 如地铁 1 号线、7 号线、9 号线。图 4.25 为巴黎地铁的中心度系数直方图, 其地铁网络的计算结果为 0.841, 较改动发生之前的地铁网络而言, 其换乘效率值  $E_{ff}$  有所降低。



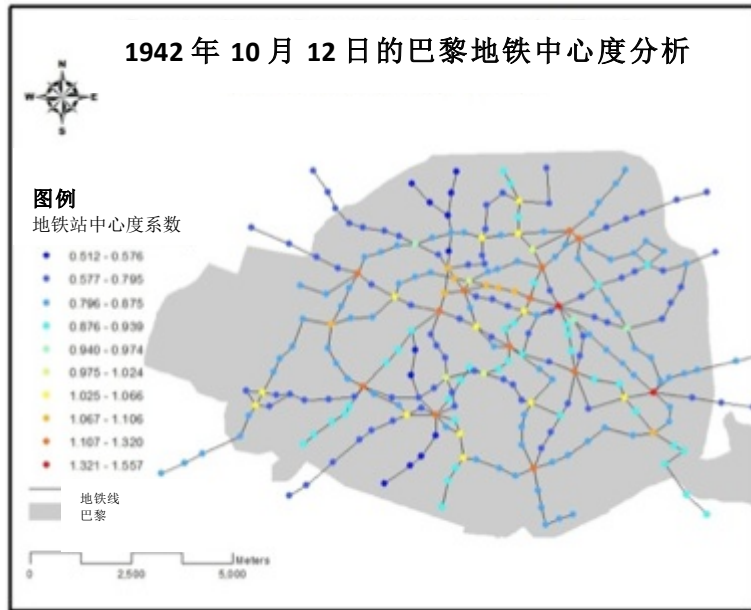


图 4.24 1942 年 10 月 12 日的巴黎地铁的中心度分析 (©王曦)

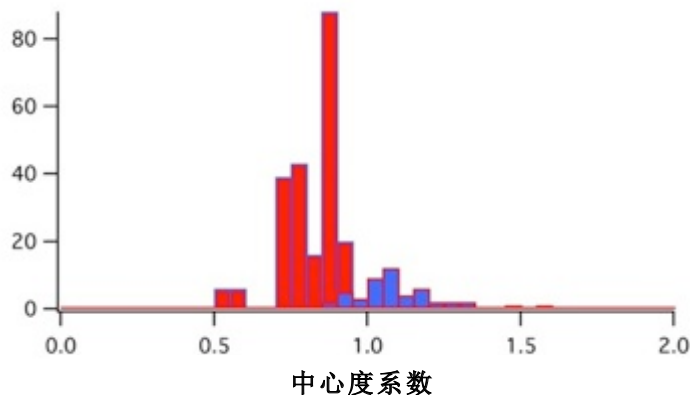


图 4.25 1942 年 10 月 12 日的巴黎地铁的中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站, 红色为非换乘站)

在研究案例四中, 地铁网络所发生的改变在于原为“L 型”直径穿越型的 5 号线终止在 Place d'Italie 站, 而由 6 号线整合了 Etoile 站到 Place d'Italie 站之间的路径。地铁站总数由 255 个增加到 260 个, 而换乘站点的数目并没有发生变化。这次改动的确使地铁 6 号线上站点的中心度得以提高, 但却使得多条地铁线路的中心度有所降低。最终就地铁网络整体而言, 其换乘效率值 Eff 由 0.860 降低为 0.841。由此可见, 在研究案例四中, 地铁网络的改变并没有显著的提高换乘站点的中心度, 相反由于将原来以“L 型”线型横穿巴黎的地铁 5 号线打断成两截, 并重新与地铁 6 号线相组合之后, 反而使地铁网络中的其它几条线路的中心度降低了。

虽然从表面上看, 改动后的地铁网络似乎更加“理性”: 有两条环线型线路 (2 号线和 6 号线) 从巴黎的城市周边穿过, 相比改动前的 5 号线以 U 型穿过大半个巴黎市区要来的更有逻辑性及美观性。但分析结果却表明, 看似难以理解的原 5 号线的设计实际上却能够大大提高整个地铁网络的换乘效率。



## 4.6 本章小结

在巴黎地铁的规划以及建设过程中，曾经有过多地地铁线路之间的调整。在本章中，我们首先从巴黎地铁网络历史演变的过程中选出了比较具有代表性的四个案例，并且将每个案例分为地铁线路改动前以及改动后的两个阶段（阶段 A 和阶段 B）。同时，我们对发生地铁线路改动的历史背景和原因都做出了一定的分析。最后我们对每个案例中两个不同的阶段巴黎地铁网络进行了中心度分析，并且比较了在这两个不同阶段中，地铁站的中心度以及整体地铁网络的换乘效率值的变化。进而分析了这些地铁线路改变对整体地铁网络所产生的影响。

我们所选取的案例一，是 1910 年 4 号线上 Châtelet 站和 Raspail 站之间的合并。这条线路是巴黎地铁发展历史上第一条从河底穿过塞纳河的线路。这样同一条地铁线路上的两个部分的接合，虽然与其他案例中的线路改动相比不算是非常显著的线路改动，但对于观察这样的改动对整体地铁网络结构的影响还是非常有意义的。在此案例中，非换乘站点数增加了 7 个，而换乘站点数只增加了一个。分析结果表明，换乘站的中心度要普遍高于非换乘站点的中心度。在改动之后，4 号线上的站点的中心度得到了普遍的提高。其上的两个火车站（Gare du Nord 站和 Gare de l'Est 站）也得到了更好的服务。而从地铁网络的整体效率来看，换乘效率值  $Eff$  由阶段 A 的 1.170 下降到阶段 B 的 1.167，由此可以分析得知，虽然换乘站数目的增加会提高整体网络的换乘效率，然而非换乘站数目的增加同时也会影响到该指数。

案例二中的线路改动是 1931 年地铁 7 号线的延伸以及和 10 号线的并轨。10 号线开通运营后，其上 Place d'Italie 到 Porte de Choisy 站的部分交通量不足，最终决定将此路段并入 7 号线。而当时的 10 号线则停止在 7 号线与 10 号线的换乘站 Jussieu 站。非换乘站点的数目并没有增加，而换乘站点的数目只增加了一个。分析结果显示换乘站点的中心度普遍高于非换乘站点的中心度。在阶段 A 中，中心度较高的非换乘站点主要分布在 5 号线上，其次是 4 号线。同时这两条线上的换乘站点的中心度也普遍比较高。在 7 号线将 10 号线部分路段合并之后，7 号线上站点的中心度得到了大幅的提高，成为了继 5 号线后中心度最高的一条线路。10 号线上地铁站点的中心度并没有显著提高，其中心度相对来说还是比较薄弱。不过整体网络的换乘效率有所提高，从阶段 A 中的 0.855 提高到了阶段 B 的 0.882。由此可见，此次改动对整体地铁网络的换乘效率是有积极影响的。

案例三中的地铁线路改动是四个案例中最为复杂的一个，涉及到 8 号线、10 号线和 14 号线三条地铁线路。在三条线路重组之后，原 8 号线 La Motte-Picquet 站和 Porte d'Auteuil 站的部分被转让给了 10 号线。原 10 号线上 Duroc 站和 Invalides 站之间的部分在重组之后被纳入 14 号线（如今的 13 号线）。这三条线路之间重组的原因是 10 号线上的交通量一直不佳，而地铁 8 号线也逐渐失去了连接巴黎周边两个森林

公园的功能，另外 14 号线（如今的 13 号线）的规划又还没有被确定下来，因此就孕育了这三条线路之间的重组。这次改动之后非换乘站点增加了五个，而换乘站点增加了一个。中心度分析结果显示换乘站的中心度普遍高于非换乘站的中心度。改动之后换乘站点的中心度得到了普遍的提高。不过 8 号线和 14 号线上的站点中心度并没有发生太大的变化，只有 10 号线上站点的中心度有些许的提高。最后，整体地铁网络的换乘效率值  $Eff$  也没有得到明显的提高，仅从阶段 A 中的 0.850 提高到了阶段 B 中的 0.856。这说明此次地铁线路之间的改动虽然比较复杂，但对整体网络的换乘效率却没有发生很大的积极影响，而主要是从局部上提高了 10 号线上站点的中心度以及某些换乘站点的中心度。

案例四中的地铁线路间的改动主要发生在 5 号线和 6 号线上。改动之后，原 5 号线终止在 Place d'Italie 站，而由 6 号线整合了 Etoile 站到 Place d'Italie 站之间的路径，从而使 6 号线形成一个巴黎南部的半环线，而 5 号线则成为了垂直与塞纳河的切线型线路。线路改动之前，5 号线与 6 号线上地铁站点的中心度差别比较大，6 号线上站点的中心度在整个地铁网络中相对较低。而改动发生之后，5 号线上非换乘站点的中心度下降，6 号线上非换乘站点的中心度增加，并且两条线路上的站点中心度达到了同一等级。除了 5 号线之外，还有多条地铁线路上的站点中心度有所下降，并且地铁网络的换乘效率  $Eff$  由 0.860 降低为 0.841。这就说明此次线路间的改动对整体地铁网络的换乘效率实际上是有消极影响的。虽然 5 号线与 6 号线之间的改动看似很符合逻辑，将“L 型”的 5 号线打断之后和原本非常短的 6 号线相连接，进而形成巴黎南部的半环形线路以及垂直塞纳河的切线型线路。然而中心度分析结果已说明了这样的改动并没有使地铁网络的换乘效率较之前有所提高。

通过对巴黎地铁网络发展中的线路改动进行回顾和分析，在本章中我们选择了四个案例对这些改动对地铁网络产生的影响进行了研究分析。我们发现并不是所有案例中的线路改动都有效地提高了地铁网络的换乘效率。例如案例三中，8 号线、10 号线和 14 号线之间的线路改动虽然复杂，但是分析结果显示这样的改动并没有对地铁网络的换乘效率产生很大的影响。而案例四中，5 号线部分线路与 6 号线的合并使得整体地铁网络的换乘效率反而降低。不过，在有些案例中，虽然整体地铁网络的换乘效率没有得到提高，但是某些换乘站或者非换乘站的中心度得到了提高。因此，还需要考虑在地铁线路改动的过程中，主要目的是提高某些站点的中心度，还是提高整体地铁网络的换乘效率。而线路改动的具体影响，还需要通过中心度分析来进行检验。

## 5 对巴黎地铁网络的现状分析

### 5.1 地铁网络形态的基本特征

#### 5.1.1 地铁站点的分布

巴黎地铁一向以其站点分布密度高而著称，它是世界上最密集的地铁网络之一。地铁规划之初的主要目的就在于服务巴黎市内的交通需求，在巴黎 86.9 平方公里的范围内有 245 个站点，站点间的平均间距为 548 米，从 4 号线的 424 米的平均间距到 14 号线 1 公里的平均间距，不过这也导致了巴黎市内地铁的运行速度只有 20 公里/小时（除了 14 号线）。大多数地铁线路在其发展进程中也逐渐延伸至巴黎郊区以扩大其服务范围，而郊区的这些站点间距相对来说普遍要比巴黎市内的站点间距更大。

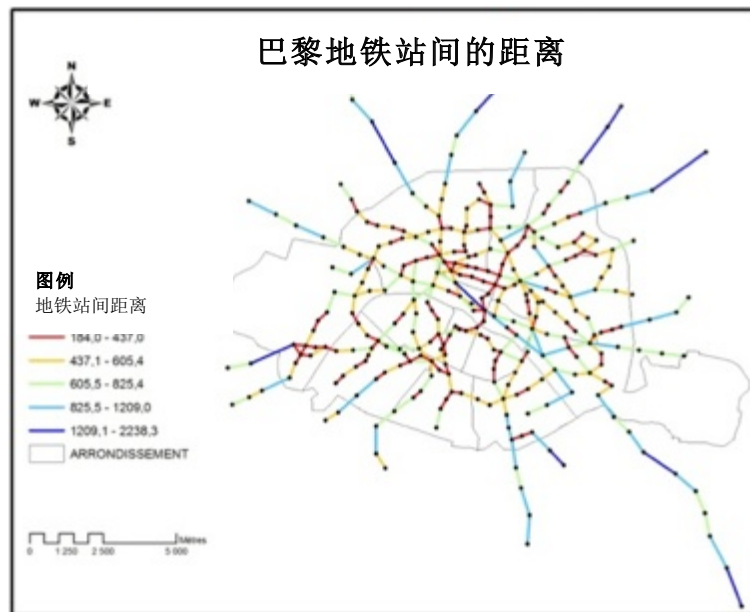


图 5.1 巴黎地铁站点之间的间距

( 数据来源 RATP Open Data , ©王曦 )

图 5.1 所示为巴黎地铁站点之间的间距分析图。从图上可以看出，巴黎城内除了地铁 14 号线之外，站点间间距普遍较小，其中站点最密集的为 4 号线，其次还有 3 号线、9 号线和 8 号线上也有部分线路的站点间距比较小。而站点间距较大的线路基本都在地铁线路的郊区延长线上。但也不是越到城市外围，站点间距越长，而是要看地铁线路具体穿过的区域而定。例如 5 号线北部的终点站与其邻站的间距就比较大。

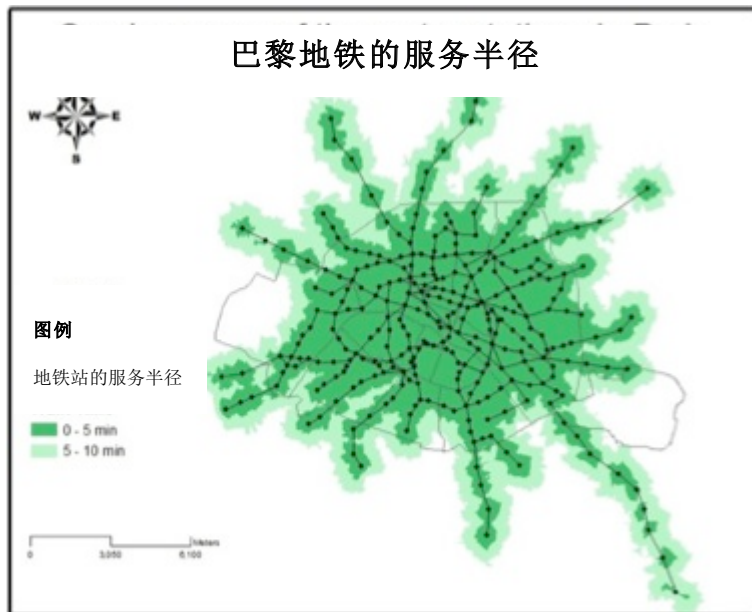


图 5.2 巴黎地铁的服务半径 (©王曦)

如图 5.2 所示为巴黎地铁的服务半径。图中深绿色的部分为 5 分钟步行之内可以到达地铁站的区域，而浅绿色部分则为 10 分钟之内步行可以到达地铁站的区域。从图中我们可以看到，整个巴黎市的居民都可以在 10 分钟步行距离之内到达地铁站，而巴黎东西部两块未被覆盖的区域则是被誉为巴黎肺叶的两个森林：Boulogne 森林和 Vincennes 森林。而这两片森林内部本身也没有公共交通可以进入，而主要是提供人们进行休闲运动的公共场所。由此可见，巴黎地铁站的可达性是非常高的，这也是为什么地铁是巴黎人重要的出行方式之一的原因。

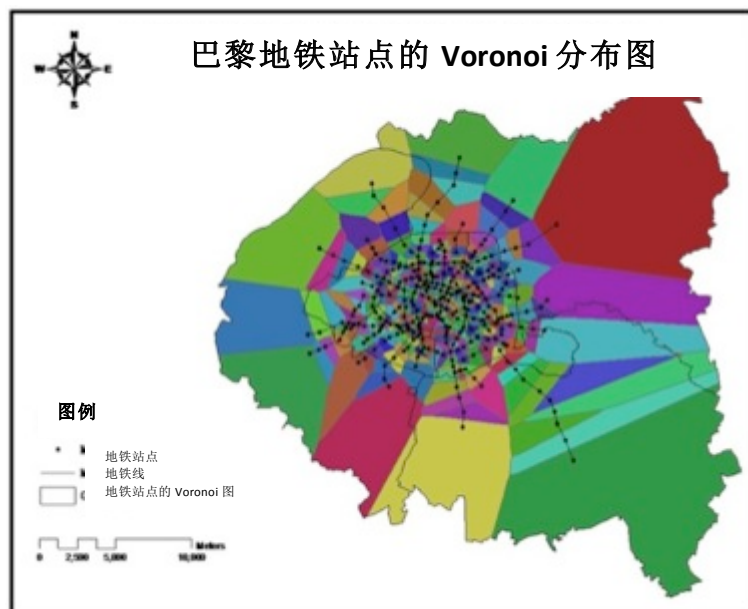


图 5.3 巴黎地铁站点的 Voronoi 分布图 (©王曦)

图 5.3 为以巴黎及其郊区的 92、93 和 94 省为研究范围所做出的地铁站点的 Voronoi 图。Voronoi 图是一种空间分隔算法，它是由一组由连接两邻点直接的垂直

平分线组成的连续多边形组成。N 个在平面上有区别的点，按照最邻近原则划分平面；每个点与它最邻区域相关联。它在建筑学、地理学和信息系统等许多领域有广泛的应用。由于此方法按照最邻近原则来划分平面，因此可以用它大致分析每个地铁站的服务半径，因为乘客选择出行地铁站的过程中，通常都会选择距离其出发点最近的地铁站。

此分析结果将被用于之后的中心度与交通量的关系比较分析之中，用以减少地铁站点不同交通量对其交通量产生的影响。然而如图 5.3 所示，对于在巴黎市外的数条线路终点站的分析结果是不合理的，由于是最后一个站点，其边界没有得到很好的定义。为了修正这一分析结果，对于这些终点站的 Voronoi 面积进行另外的计算。计算方法为取终点站与其相邻站点（同一条地铁线及不同地铁线上的）的距离来做矩形。

### 5.1.2 地铁线路与道路网络的关系

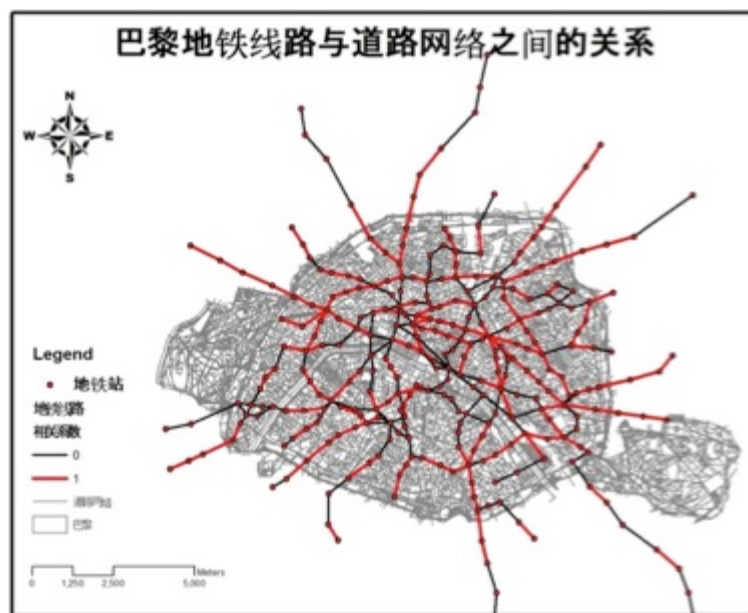


图 5.7 巴黎地铁线路与道路网络之间的关系  
(数据来源 IGN & RATP 开放数据，©王曦)

巴黎地铁系统大部分都是地下网络，在其建设初期，常常采用明挖回填法来进行隧道的施工，也正是由于这个原因，有一些巴黎地铁线路与其上的道路的走向是吻合的。如图 5.7 所示，为巴黎地铁线路与道路网络之间的关系，红色的线路代表两个网络重合，如最早建设的地铁 1 号线、2 号线以及 6 号线，另外还有一些地铁线路向环线外放射延伸的部分都基本与巴黎的道路网络相重合。据统计，这样的地铁线路共有 110 多公里，占到整个地铁网络的约 50%。由此可见，巴黎地铁网络与其道路网络的联系还是十分密切的，一方面是受到施工技术的影响，另外一方面也

可以看出地铁网络设计时的思路也参考了道路网络的结构。

国际经验表明，成功的地铁网络似乎总是沿着主要放射线到繁荣的城市中心的，而旨在用以带动区域发展的地铁线路（即『全新』的线路）通常是有风险的。因为大多数乘坐地铁的乘客也来自于之前的公交系统的乘客，只有当公交系统线上的交通量饱和到一定程度的交通走廊才能够作为地铁网络设计的候选项。同时地铁系统需要整合和规划土地利用，特别是能够连接主要的城内公交和火车站，这就涉及到了多模式交通整合的问题。巴黎在这方面也做得非常好，但由于不是本论文的研究重点，在此不做赘述。

### 5.1.3 地铁线路的特征

V.R. Vuchic (2005) 根据地铁线的几何形态和其在城市中的位置将它们分成 7 个基本类型：辐射线型(Radial line)、直径穿越型(Diametrical line)、切线型(Tangential line)、内环线型(Circumferential line)、回路线型(Loop line)、树杈型(Branch line)和主干加支线型(Trunk with a feeder)。每种类型的地铁线都有其在地铁网络中的不同特征，理解这些特征能够有助于更好的设计地铁网络。这些不同类型的线路在地铁网中发挥的作用是各不相同的。巴黎地铁网络中包含了这 7 种类型的地铁线路，其中最多的是直径穿越型，一共有 8 条地铁线路，较少的为辐射线型和树杈型各一条（如表 5.1 所示）。

表 5.1 巴黎地铁线路的几种类型

线路类型	辐射线型	直径穿越型	切线型	内环线型	回路线型	树杈型	主干加支线型
巴黎地铁线	11 号线	1、3、4、7、8、9、12 和 14 号线	5 号和 10 号线和 13 号线	2 号和 6 号线	7b 和 10 号线	7 号线和 13 号线	3、3b 号线以及 7、7b 号线
线路条数	1	8	3	2	2	1	2

巴黎地铁网络中的 8 条直径穿越型线路中，4 号线、7 号线和 12 号线是服务于南北方向的交通需求的。服务东西方向客流量的则有 1 号线和 3 号线（东北——西北）以及 8 号线和 9 号线（东南——西南）。最后由最新建的地铁 14 号线来加强西北——东南方向的运输服务。直径穿越型线路的终点站在城市两边的郊区，线路从市中心穿过，比起辐射线型能够服务更多的城市区域，保证城市两端交通量的平衡



分布，并且为换乘提供了更多的机会。直径穿越型线路还可以以其它的形态出现，如 L 型线和 U 型线等。从图中可以看出（见图 5.8），巴黎的这些直径穿越型线路设计的主要思路是服务于『沿着塞纳河』以及『垂直于塞纳河』两个方向的交通流量的。这八条地铁线以类似网格的形态覆盖了巴黎的主要交通走廊，构成了巴黎地铁网络的主要架构。

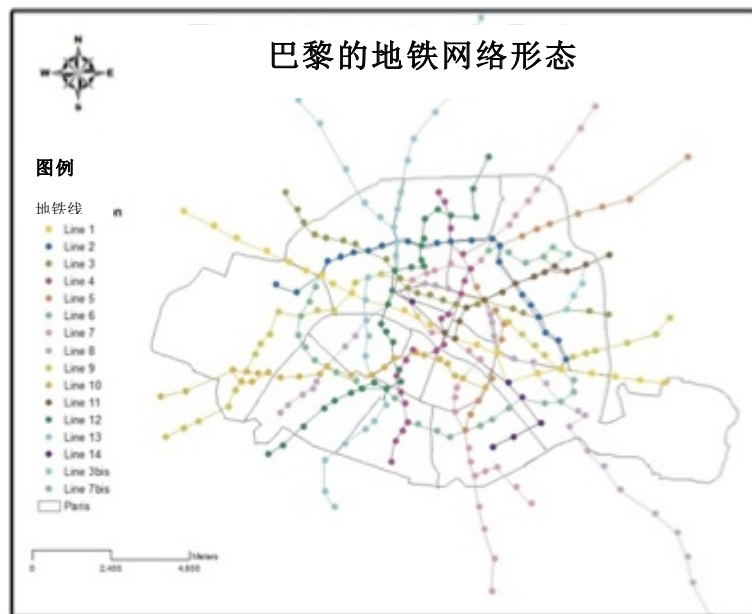


图 5.8 巴黎的地铁网络形态（数据来源 RATP 开放数据 ©王曦）

巴黎地铁网络中另外一个比较重要的地铁线型是内环线型（2 号线和 6 号线），它们围绕着城市中心形成一个环形，并且与辐射线型及直径穿越线型地铁线相交，因此对这些线路起到分散交通量的作用。这两条地铁线均与其它 11 条地铁线有换乘，因此连接度非常高。通常，处于城市郊区的环线型地铁可以实现郊区与郊区之间的通勤，而很好的避免了由于穿过市中心而带来的不必要的拥挤。内环线性在整个地铁网络中起到十分重要的作用，它提供了与其它多条地铁线的换乘，起到了整合各个地铁线的作用，因此也通常是交通量负荷比较大的线路。不同于巴黎的由两条独立线路组成的内环线型地铁线，有的城市直接采用一整条环线的设计，例如北京、莫斯科和首尔等。

11 号线作为辐射线型，其终点站之一位于巴黎市中心的 Chatelet 站，而另一端则处于东北方向的市郊。其作用就在于服务从市中心到郊区的通勤需求。辐射线的不足之处在于，由于它终止于市中心，一方面它所服务的区域有限，乘客不得不停进行换乘来实现去往城市的其它区域；另外一方面，由于中心城区的土地利用密度高，空间更为宝贵，因此建设地铁终点站的造价也会更高。不过辐射线型的运用非常广泛，一些区域快轨以及服务郊区的公交线路都是以辐射线的形式而涉及的。

5 号线、10 号线和 13 号线是切线型地铁线，它们没有从城市中心穿过，因此交

通需求量比辐射线型相对较少。切线型地铁一般在网格形态路网的城市比较容易出现，例如芝加哥、费城以及多伦多。它们的作用在于弥补其它线路服务不足的问题，有的时候可能沿着一些商业中心或学校而分布。值得提出的是，10 号线还采用了回路线型的设计。回路线型一般都是出现在一条地铁线路的其中一段，通常是单向行驶的，可能出现在 CBD 或者城市郊区，有利于交通流的汇集与分散。巴黎地铁网络中还有 7bis 号线采用了回路线型设计，不论是 10 号线还是 7bis 号线的回路线型，它们的交通需求量都不是很高，除了与其站点分布有关，也是由于单向行驶的分流造成的。

另外，7 号线与 13 号线还采用了树叉型地铁线的设计。日常城市交通出行的过程常常是由城市外围人口汇集到城市中心，再由人口密集的城市中心辐射到城市郊区这两个方向的主要交通流构成的。树杈型的地铁线路就是为了适应于这一交通走向，将城中心区域人口分配到密度较低的城市郊区而设计的。也具有此功能的另外一种设计是主干加支线型的设计，与树杈型的不同之处在于它的支线与主干是独立的不同线路。在巴黎地铁网络中的主干加支线型线路为 3 号线与 3bis 及 7 号线与 7bis，3bis 号线联接了 3 号线与 11 号线，7bis 号线则联接了 7 号线与 5 号线以及 11 号线。

## 5.2 对巴黎地铁网络现状的中心度分析

### 5.2.1 巴黎地铁站的中心度分析

#### 5.2.1.1 巴黎地铁站的中心度系数

图 5.9 显示了巴黎地铁站点的中心度分析结果。结果显示，在同一条地铁线路上的非换乘站有相同的中心度，而换乘站的中心度往往比非换乘站的中心度要高。这是由于它积累了经过此换乘站的的各条线路的中心度。五个中心度最高的站点包括：République、Châtelet、Opéra、Nation 和 Montparnasse-Bienvenue，它们都是地铁网络中非常重要的换乘站。例如，在地铁站 République，一共有五条地铁线路在这里交错，包括地铁 3 号线，5 号线、8 号线、9 号线和 11 号线。中心度最低的站点主要是地铁 11 号线上的非换乘站，该条线路是一条放射线型，一端终点站设在城市中心的 Châtelet 站，并向东北方向延伸到郊区，由于线路段站点少，并且与 6 号线、10 号线、12 号线和 13 号线都没有换乘。巴黎地铁网络的换乘效率值 Eff 计算结果为 0.860。

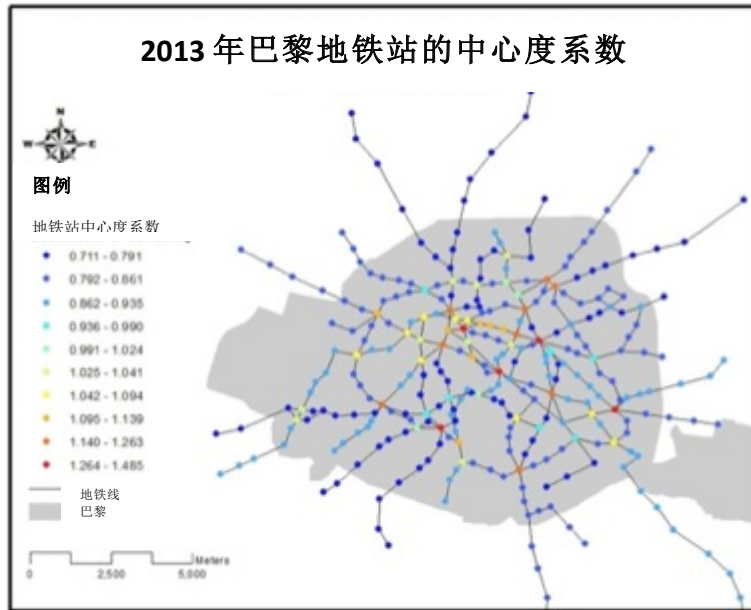


图 5.9 2013 年巴黎地铁站的中心度系数 ( ©王曦 )

如图 5.10 所示为巴黎地铁站中心度分析的直方图。图中蓝色代表的是换乘站，而红色则为非换乘站，我们可以观察到换乘站的中心度普遍高于非换乘站，但也有个别换乘站和某些线路上的非换乘站中心度相当。

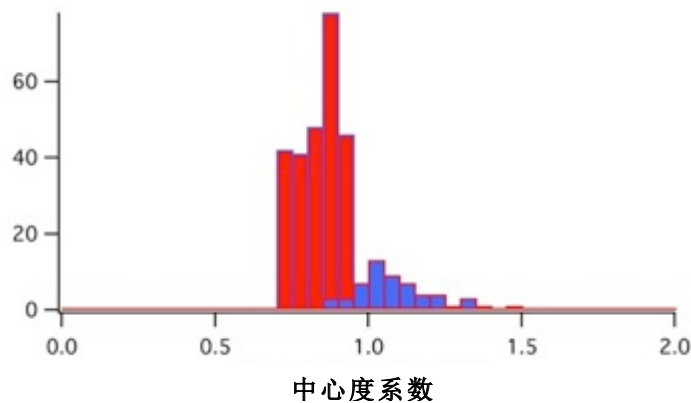


图 5.10 巴黎地铁站中心度系数直方图 ( ©王曦 )  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

如表 5.2 中所示，为巴黎地铁各线路之间的换乘次数。从图中可看出，需要换乘次数最多的为 10 号线，它分别与五条地铁线路都需要两次换乘，依次是 10 号、11 号和 12 号线，它们分别与四条线路需要两次换乘，最后是 8 号线与 9 号线，都只需要和一条线路进行两次换乘。而 4 号线需要最少次数的换乘，它与其它所有地铁线路都有直接换乘。两条线路之间只需一次换乘的，我们将其连接度计为 1。连接度是指该地铁线路与其它地铁线路有直接换乘的条数。

表 5.2 巴黎地铁各线路间的换乘次数

	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	6 号线	7 号线	8 号线	9 号线	10 号线	11 号线	12 号线	13 号线	14 号线
1 号线	0	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
2 号线	1	0	1	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2
3 号线	2	1	0	1	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1
4 号线	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5 号线	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2
6 号线	1	1	2	1	1	0	1	1	1	1	2	1	1	1
7 号线	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	2	2	2
8 号线	1	2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
9 号线	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
10 号线	2	2	2	1	1	1	1	1	1	0	2	1	1	2
11 号线	1	1	1	1	1	2	1	1	1	2	0	2	2	1
12 号线	1	1	1	1	2	1	2	1	2	1	2	0	1	1
13 号线	1	1	1	1	2	1	2	1	1	1	2	1	0	1
14 号线	1	2	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	0
两次 换乘 线路	2	3	3	0	3	2	2	1	1	5	4	4	3	4

如图 5.11 所示为巴黎地铁线路的中心度系数与其连接度之间的关联性。所谓巴黎地铁线路的中心度，根据中心度的计算公式来看，其实即为地铁线路上的非换乘站的中心度。从下面这幅分析图中我们可以看到，其关联性非常的强，相关系数的值高达 0.9061。可见地铁线路上的非换乘站的中心度直接取决于该线路与其他地铁线路的连接度。这个发现便于我们对不同的地铁模型进行研究。在接下来的一张中，我们就通过对巴黎地铁各线路之间的连接度进行研究而设计出了两个巴黎地铁模型，并对其特征进行了进一步的研究分析。

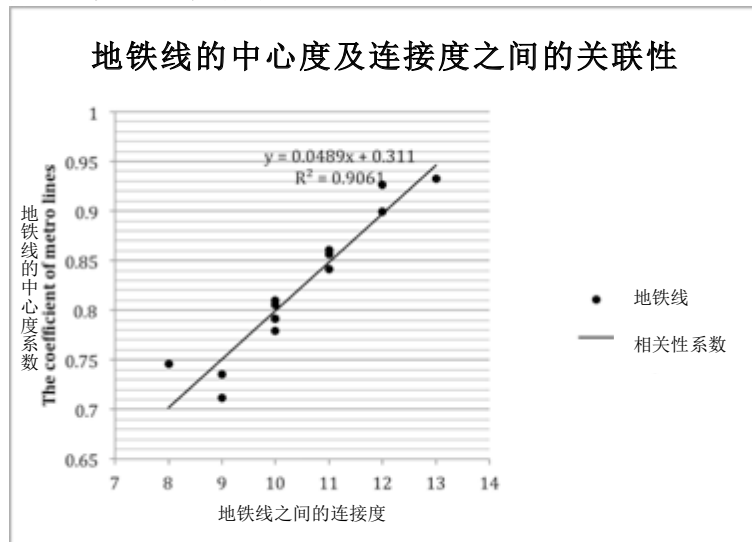


图 5.11 地铁线的中心度及连接度之间的关联性 (©王曦)

### 5.2.1.2 考虑区域快轨 RER 影响的巴黎地铁网络中心度分析

在上一章节中，中心度分析仅仅涉及到巴黎的地铁站点。但根据巴黎地铁公司（RATP）的规定，同样的交通卡或者地铁票可以方便乘客们在地铁与 RER 区域快铁之间自由的换乘。也就是说在巴黎乘坐地铁的过程当中，RER 也常常被看做是地铁网络的一部分。这样一来，为了模拟真实的交通出行，巴黎地铁与 RER 之间的换乘站点应该与其他的换乘站点有所区别。因此，我们应该把地铁与 RER 之间的换乘站点考虑进来。

在此章节中，除了 303 个巴黎地铁站之外，我们还考虑了地铁与五条区域快轨 RER（分别是 A、B、C、D、E 线）的换乘站，一共有 71 个。在换乘方面，我们采集信息时主要是参考巴黎大众运输公司官方网站 (<http://www.ratp.fr/>) 上的各条线路的地图所提供的换乘信息，不过有的地铁站台与 RER 站台之间相对比较近，而有的可能需要步行更长时间以完成换乘，例如 RER C 上的 Avenue Henri Martin 站和地铁 10 号线的 Rue de la Pompe 站之间的换乘，虽然两站之间有相当的距离，并且连站点的名字都不一样（有很多地铁 RER 和地铁的换乘站都采用相同或相似的站名），但

只要是地铁公司的官网上提供了相应的换乘信息的，就均被考虑到此项分析之中。

如图 5.12 为考虑 RER 换乘站之后的巴黎地铁中心度系数图。图中中心度最高的五个站点中仍然有 Châtelet 站、Opéra 站和 Montparnasse-Bienvenue 站。而排名上升到前五名之列的 Gare du Nord 站及 Saint-Michel 站都与多条 RER 线路有换乘。地铁 4 号线上的非换乘站中心度有所提高，而中心度系数最低的几个站点主要是 12 号线上的非换乘站。从图上我们可以看到由于 RER 换乘站的影响，某些之前为非换乘站的中心度得到了显著提高。此分析结果更符合实际情况，因为 RER 从郊区将大量的交通量带入了地铁系统之中。同理，火车站附近的地铁站点也将有大量的乘客从外省进入地铁系统之中，但在此节研究中暂不做详细讨论。

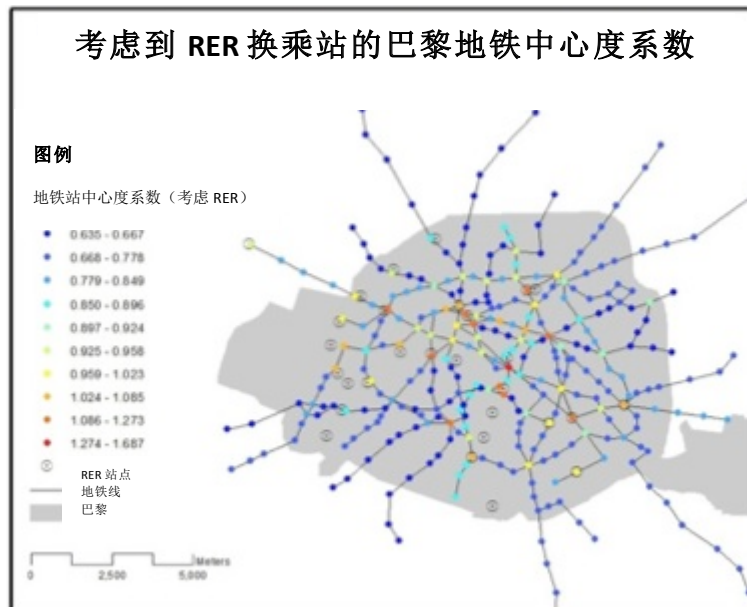


图 5.12 考虑到 RER 换乘站的巴黎地铁中心度系数 (©王曦)

如图 5.13 所示为考虑 RER 之后的地铁站中心度系数直方图，可以看到蓝色所代表的中心站点普遍比红色所代表的非换乘站中心度要高，而该考虑 RER 换乘站的地铁系统所计算出来的换乘效率值  $Eff$  为 0.771。可见在考虑 RER 换乘站之后，虽然提高了部分地铁站的中心度系数，但是由于 RER 线路向巴黎郊区延伸的地铁站数相对较多，而且与其它线路并没有换乘站点，而且多增加了五条线路，因此降低了整个网络的换乘效率值。由此可见，在地铁网络设计的过程中需要明确规划目标：如果想要实现地铁网络给各个区域提供均等的服务，让地铁网络中的任意站点能够通过更少的换乘来实现出行，则需要设计出效率指数较高的地铁网络；反之，如果设计目标更重要的是能够提高城市中某些交通枢纽的中心度及连接度。



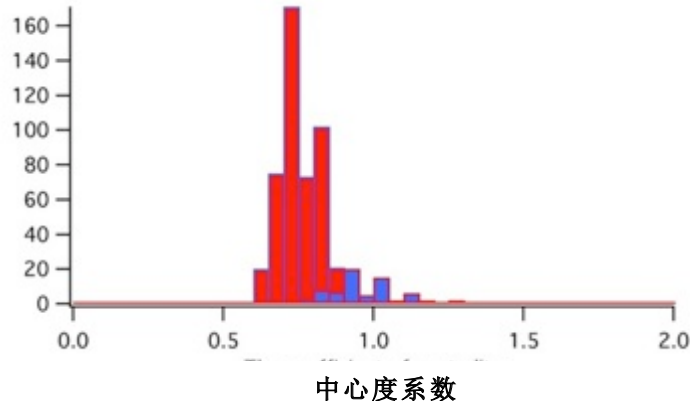


图 5.13 考虑 RER 的巴黎地铁站中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站, 红色为非换乘站)

### 5.3 巴黎地铁站的中心度与交通量的关系

表 5.3 显示了 2011 年巴黎地铁的进站交通量中, 排名前列的地铁站的组成类型。在交通量排名前 50 的地铁站中, 有 72% 是换乘站点。某些线路的终点站也有比较显著的交通量, 这可能是由于终点站的多模式交通整合起到了很好的连接作用, 从而带来了更多的交通量。另外, 非换乘站所占比例比较小。在交通量排名前 100 的地铁站中, 换乘站仍然占有最重要的比重。

表 5.3 巴黎 2011 年进站交通量排名前列的站点类型组成

2011 年地铁站交通量排名	地铁站点类型			
	换乘站	终点站	非换乘站	
			在巴黎	在郊区
前 50 名	36 (72%)	6 (12%)	4 (8%)	4 (8%)
前 100 名	53 (53%)	13 (13%)	23 (23%)	11 (11%)

从以上的数据中, 我们可以观察到在巴黎地铁中心度分析结果中也有类似的现象, 即换乘站点的中心度普遍比非换乘站要高。中心度系数可以被用来分析一个结点在地铁网络中的相对重要性的, 而基于最简换乘路径的结构中心度 (Structurality) 能反映出从某一站点出发, 去到地铁网络中任何一站点的的换乘效率。因此将此中心度系数与交通量来进行比较会有很有意思的发现。接下来, 笔者将会对这两者在换乘站点和单一地铁线路等不同尺度上进行比较。

### 5.3.1 换乘站点及其周边非换乘站的中心度与交通量的关系

为了更客观的观察巴黎地铁的交通量，我们需要减少由每个站点的服务半径，以及服务人口的不同所带来的影响。首先我们计算了基于地铁站点的 Voronoi 面积，并且矫正了地铁终点站由于没有界限定义，而 Voronoi 面积失真的部分站点，并由此计算出每个站点的进站交通量与其 Voronoi 面积的比值，以此作为每个站点的交通量密度（如图 5.14 所示）。之后，为了能够更精确的排除地铁站服务人口的这一变量，我们计算了地铁站点进站交通量与其服务人口之间的比值来作为其交通量密度。在中心度分析结果以及巴黎地铁进站交通密度图中，我们都观察到了一个特殊的“水泵效应”，通常在换乘站点周围的非换乘站的中心度以及交通量都呈现减弱的趋势。

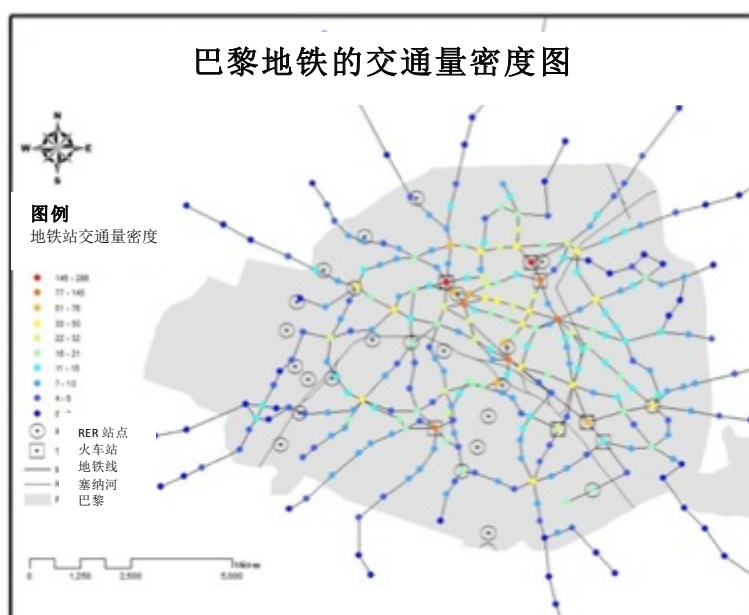


图 5.14 巴黎地铁的交通量密度图 (©王曦)

为了能够更客观的分析这一现象，我们做出了如图 5.15 所示的换乘站点及其周围非换乘站的中心度以及交通量的关联分析。也就是我们只选取了巴黎地铁网络中的换乘站点，但不包括那些相邻站点同样也为换乘站点的地铁站。例如与换乘站 Gare du Nord 站相邻的三个站点都同样也是换乘站，因此我们并没有考虑 Gare du Nord 站。之后，针对每个换乘站，我们找出了其周边对应的非换乘站，并且计算了换乘站点与其相应的非换乘站的中心度以及交通量的差值，从而得到了图 5.15 中的结果。从图中我们可以看到，黄色的圆形点 (0, 0) 代表的是计算差值之后的换乘站点，而浅蓝色的菱形代表的则是其周边的大部分非换乘站，另外几组不同颜色的站点则代表的是几个火车站附近以及城市中心枢纽、多个 RER 换乘站 Chatelet-les-Halles 站旁边的非换乘站等。

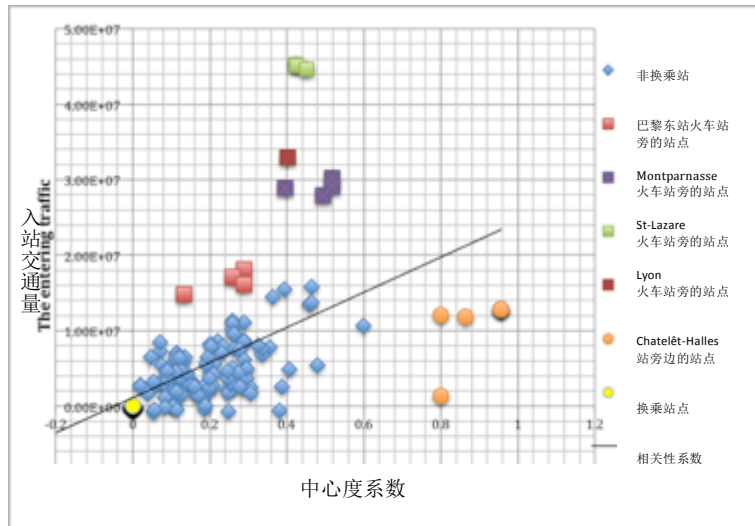


图 5.15 换乘站点周围与非换乘站站点的中心度和交通量的关系 (©王曦)

从该图我们可以看出，所有的换乘站点的中心度都要高于其周边的非换乘站，其中只有少数的非换乘站交通量要高于换乘站的交通量。这是由于这些非换乘站处于火车站或者 RER 附近，因此受到了外来客流的影响。

另外，我们可以观察到其他几组颜色的数据也存在一定的规律。例如绿色的数据点代表的是 St-Lazare 站附近的非换乘站与其的交通量差值，St-Lazare 站是火车站、地铁站及 RER 换乘站。这些的交通量差值要远远高于其它非换乘站与其换乘站点的相对值，然而其中心度相对于其它非换乘站来说又没有那么重要。这就说明了当换乘站在火车站附近时，由火车系统带来的人流量对地铁进站交通量的影响。另外，相同的情况还有火车站 Gare de Lyon（深红色方形数据点）、Gare Montparnasse 站（紫色方形数据点）以及 Gare de l'Est 站（红色方形数据点）这三个火车站附近的非换乘站，均分布在函数线的上方。

除此之外，橙色圆形数据点所代表的地铁与 RER 的换乘站点 Chatelet-les-Halles 站周边的非换乘站却呈现出相反的状态，即虽然它们与其换乘站的中心度差值比较大，但交通量却不如其它几组火车站附近的数据。这主要是由于在考虑了 RER 之后，其中心度得到显著提高，但 RER 的影响毕竟不如其他的远程火车所带来的交通量的影响，并且有一些非换乘站与 RER 之间的并没有很好的连接起来，因此交通量自然体现不出其影响。

由此可见，在具体案例分析中，还需要考虑地铁系统与其他轨道交通以及交通系统的换乘和驳接，毕竟地铁网络并不是单独存在的，最终需要实现的也是各个交通方式之间的衔接及互补。

### 5.3.2 单一地铁线路上站点的中心度与交通量的关系

在下面这个部分，将从巴黎地铁网络中选出四个典型的地铁线路类型，分别是 11 号线辐射线型、8 号线直径穿越型、5 号线切线型、2 号线内环线型。我们将其中中心度系数（考虑了 RER 换乘站）和交通量密度进行比较，并进而考察它们的相关性。交通量密度的分布能够很好的体现不同地铁线路类型的特征，帮助我们了解交通流的走向。同时，分析中心度系数与交通量密度之间的相互关系可以为之后的交通量估计以及地铁网络的分析提供依据。

#### (1) 辐射线型：地铁 11 号线

11 号线作为辐射线型的案例始于城市中心的 Châtelet 站，并辐射直至巴黎郊区。图 5.16 显示了 11 号线中心度系数曲线（虚线）及其交通量密度曲线（实线）的趋势。从图中我们可以看到，两个曲线的吻合程度非常的高，中心度系数曲线能够很好的指示出几个交通量密度大的重要站点，例如 Châtelet 站、République 站以及 Belleville 站等。

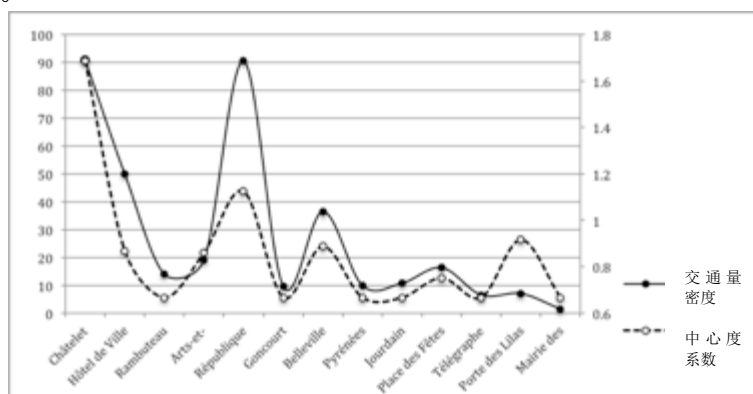


图 5.16 地铁 11 号线上的交通量密度和中心度系数 (©王曦)

两条曲线之间有所区别的在于，Châtelet 站的中心度系数要高于 République 站，而其交通量密度确实相当的。这是由于在中心度分析过程中，我们同时也考虑了地铁与 RER 的换乘站点，对于 Châtelet 站除了 4 条地铁线的换乘还考虑了 RER 的 A 线、B 线和 D 线，因此其中心度的指数自然要高一些。两条曲线的另外一个区别之处在于，地铁站 Porte des Lilas 的中心度的重要性要明显高于其交通密度在整条地铁线上的重要程度。这是由于该地铁站与 3 号线支线 3bis 有换乘，而为了简化计算我们直接将 3bis 线当做 3 号线来考虑，而实际情况是 3bis 线上的交通量比较薄弱，因此该站点的实际重要程度是低于其中心度系数所显示的程度的。从 11 号线我们可以观察到辐射线型的交通量特征，即通常会在城市中心的一端有较高的交通量，而在位于郊区的一段则有交通量的衰减。

## (2) 直径穿越型：地铁 8 号线

地铁 8 号线是直径穿越型的例子，不同于 11 号线的是，8 号线的两端终点站都在城市中心区之外，而其路径则穿越了整个城市。图 5.17 显示了 8 号线中心度系数曲线（虚线）及其交通量密度曲线（实线）的趋势。从图中可以看到中心度系数曲线很好的指示交通量密度曲线的走向，并且突出了几个重要的换乘站点，例如 Opéra 站、République 站以及 Bastille 站等。其中中心度系数及交通量密度都很高的 Opéra 站既是三条地铁线的换乘站，同时与 RER 的 A 线也有换乘。

这两条曲线的不同之处在于相对于交通量密度的数据来说，地铁站 Invalides 的中心度系数偏高，而地铁站 Richelieu-Drouot 和地铁站 Grands Boulevards 的中心度又偏低。对于地铁站 Invalides 来说，其中心度系数之所以高的原因是它是地铁 8 号线以及 13 号线与 RER C 线的换乘站点，但由于该站地处塞纳河边，再加上周围有军事博物馆荣军院，道路宽敞开阔，因此其交通量密度较小。相反的地铁站 Richelieu-Drouot 和地铁站 Grands Boulevards 附近的人流更加密集，并且由于与地铁站 Opéra 比较接近，也受到该站点所谓“水泵效应”的影响，其影响力延伸到了周围的站点。

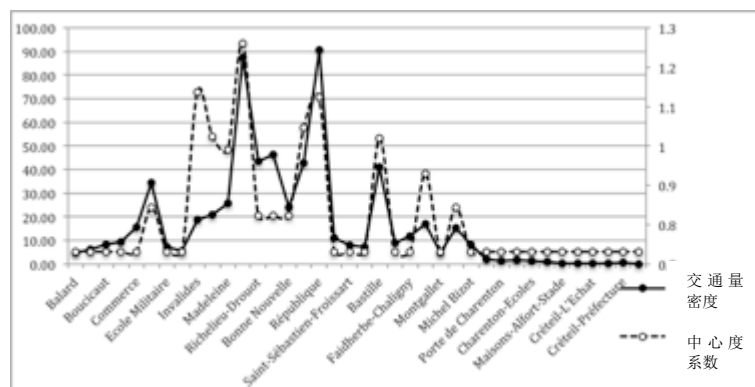


图 5.17 地铁 8 号线上的交通量密度和中心度系数 (©王曦)

直径穿越型线路的特点在于，其交通量在线路中间穿过城市中心的部分表现会比较突出，而到线路的两端，即向城市郊区延伸的部分会逐渐减弱。从整体上来说，其功能在于服务城市郊区两端到城市中心地区的交通流。

## (3) 切线型：地铁 5 号线

5 号线作为切线型的案例，其两个终点站都如直径穿越型线路一样位处城市郊区，但是其路径本身并不穿过城市中心，而是从旁经过。在巴黎地铁 5 号线的案例中，其北边的一段一直延伸到了巴黎的北郊，而南部的终点站则是与内环线型 6 号线以及 7 号线相交在 Place d'Italie 站。

如图 5.18 所示，显示了 5 号线中心度系数曲线（虚线）及其交通量密度曲线



(实线)的趋势。我们可以观察到两者之间有很好的 consistency。5号线的北端(曲线左端)由于延伸向城郊,因此交通量逐渐的减少。而其南部终点站,同时也是6号线及7号线的换乘站的 Place d'Italie 站的中心度系数及交通量密度都比较高。另外,该条线路上还有两个火车站,即 Gare du Nord 站及 Gare d'Austerlitz 站,而只有 Gare du Nord 站的中心度系数体现出了其作为火车站的重要性是由于我们考虑了该换乘站与 RER B 线和 D 线的换乘。在上面其他地铁线的案例中,我们可以观察到“水泵效应”,而在5号线上该现象更为明显,即换乘站点周围的非换乘站的中心度系数以及交通量密度都有减弱的趋势,在图 5.18 中的具体体现则为曲线的上下起伏。

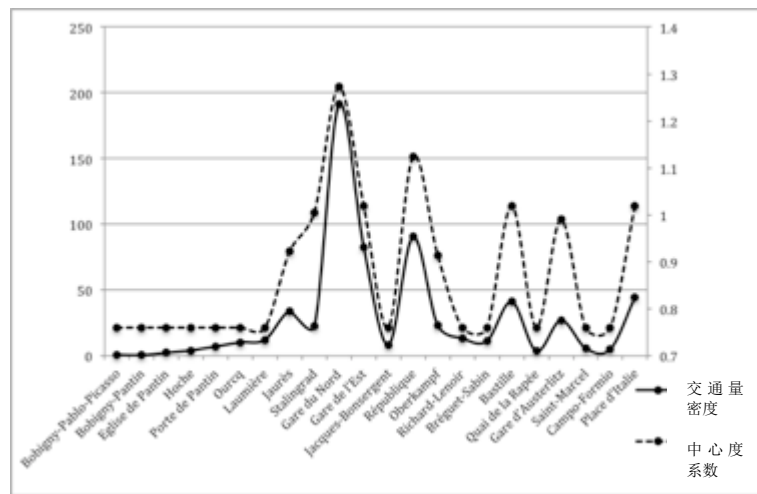


图 5.18 地铁 5 号线上的交通量密度和中心度系数 (©王曦)

#### (4) 内环线型：地铁 2 号线

内环线型一般在地铁网络中起到很重要的作用,因为它负责将辐射线型和直径穿越型地铁线路上的客流量在城市周边分散开来了。内环线型一般与众多地铁线路都有换乘。图 5.19 中显示地铁 2 号线上的交通量密度相对于以上其它线路的交通量密度分布地较为平均。而交通量密度曲线与中心度系数曲线的吻合程度也较好。

此外,图中一个反差比较大的地方主要是在 2 号线一端的终点站 Porte Dauphine 站上面。该站点的中心度系数值非常高,而交通量密度却相反非常低。这主要是在计算中心度系数的过程当中,我们根据 SNCF 所提供的 RER C 线线路图中的换乘信息,认定地铁 2 号线上的 Porte Dauphine 站与 RER C 线上的 Avenue Foch 站有换乘,因此提高了该站点的中心度系数值。然而在现实情况中,RER C 线与 2 号线在此站点有一定的距离,换乘实际上存在一定的难度,因此并没有给 2 号线的该站的交通量带来重要的影响。



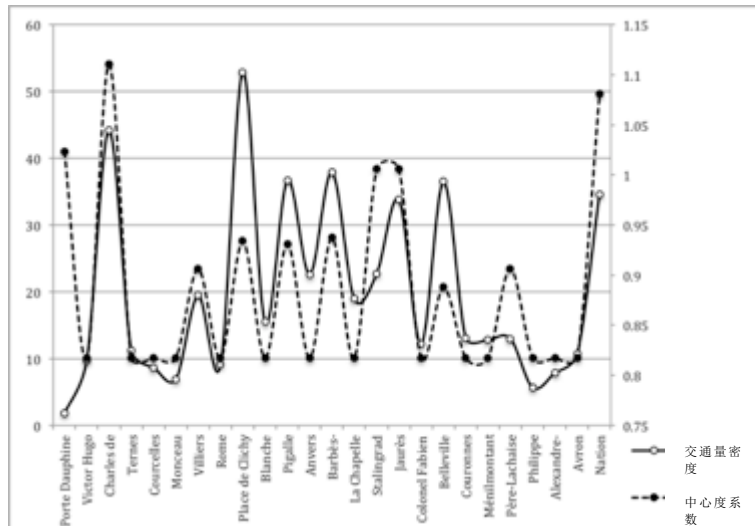


图 5.19 地铁 2 号线上的交通量密度和中心度系数 (©王曦)

通过比较中心度系数曲线和 2011 年的进站交通量密度曲线，我们发现结果表明两者之间有很好的 consistency。另外，不同类型的地铁线会有不同的交通量表现，由于地铁网络是以地铁线为组成元素的，因此以不同类型的地铁线组成的地铁网络也会呈现出不同的特征。此分析结果表明，中心度分析可以服务于在地铁网络设计的过程中，对不同的设计方案进行比较，从而了解不同换乘站点在地铁网络中的相对重要性。并且通过分析某个地铁站在地铁网络内部的重要性，可以帮助设计与其容量配套的交通站点设施，以满足不同乘客量的需求。

## 5.4 地铁系统的简化模型研究

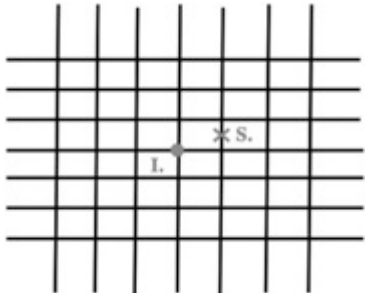
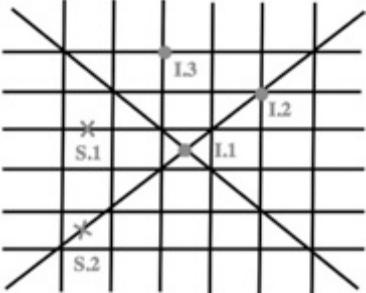
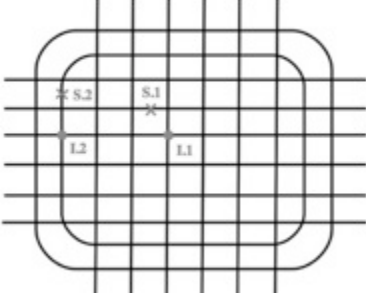
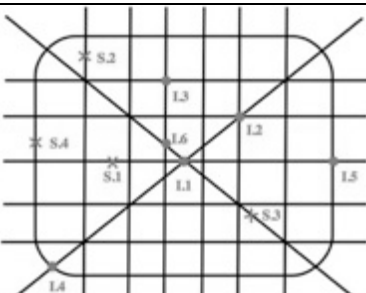
在上面几节的分析研究中，我们主要针对巴黎地铁站的中心度，以及站点中心度与交通量之间的关系进行了分析比较。我们观察到不同类型的线路在中心度和交通量方面都会有一些共同之处，那么由这些不同类型的地铁线路所组成的地铁网络又会有怎样的特性呢？在本节中，我们将进行一些抽象化的模型研究。为了进一步研究不同模式的地铁网络，我们首先做了四个简化的地铁模型，并且将通过分析对每个模型的特征、站点中心度以及地铁网络换乘效率进行比较，以便得到一些有关地铁网络设计方面的规律。

如表 5.4 中所示为四个简单的地铁模型。模型一是由直径穿越型和切线性地铁线路组成的。它的换乘站点比非换乘站的中心度要高出许多。地铁线之间的连接度也没有其他模型那么高。模型二在网格模型一的基础上，采用了两条对角直径穿越型地铁线。在对角线上的换乘站点有最高的中心度，对角线上的非换乘站也比其他非换乘站的中心度要高。另外，此模型的地铁线间连接度也比较好。模型三在之前的网格模型基础上增加了两条内环线。网格模型上的换乘站比内环线上的换乘站有更高的中心度。而内环线上的非换乘站却比其他非换乘站的中心度要高，但也低于

模型二中对角线的非换乘站中心度。模型四由一条内环线型、三条直径穿越型和十条切线型地铁线构成。所有的换乘站点都有很好的中心度，然而非换乘站都表现比较一般。此模型在所有模型中拥有最好的连接度。

通过研究这些地铁模型，可以利用最少的元素来研究某些现象下的存在机制。通过对这些模型的中心度 Structurality 的分析和比较，可以帮助构建新的地铁网络，并有效预测网络中的热点。

表 5.4 四个简单的地铁模型

地铁模型	地铁线的连接度	模型描述
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 14 条线有 7 个直接连接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 条直径穿越型;</li> <li>- 12 条切线型.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 条线有 13 个直接连接</li> <li>- 12 条线有 8 个直接连接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 条对角直径穿越型;</li> <li>- 12 条切线型.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 条线有 12 个直接连接.</li> <li>- 12 条线有 8 个直接连接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 2 条直径穿越型;</li> <li>- 2 条内环线型;</li> <li>- 10 条切线型.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 6 条线有 8 个直接连接</li> <li>- 5 条线有 9 个直接连接</li> <li>- 2 条线有 13 个直接连接</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1 条内环线型;</li> <li>- 3 条对角直径穿越型;</li> <li>- 10 条切线型.</li> </ul>

### 5.4.1 简化模型一的中心度分析

为了能够便于比较，在做简化模型时我们采用了巴黎地铁的一些参数，例如 14 条地铁线路以及 303 个地铁站点等。在模型一中，主要采用的是栅格型垂直相交的地铁线路，从而一共产生了 49 个换乘站点，而除了两条线路之外，其余地铁线上的地铁站点数均为 18 个，而最下端的水平线路以及最右段的垂直线上均有 19 个站点。如图 5.20 所示，为简化模型一的中心度数值图。其中只显示了换乘站点，而地铁线路上的非换乘站则用地铁线路来显示。从图中可以看出，换乘站的中心度明显高于非换乘站，并且站点总数多的线路上非换乘站以及换乘站的中心度都会依次递增。而中心度最高的站点则是两条拥有站点总数较多的地铁线路的换乘站。这说明决定中心度高低的先决条件一是站点的类型，其次则是所在地铁线路上的地铁站点总数的多少。通过该模型计算出来的地铁网络效率 Eff 为 0.830。

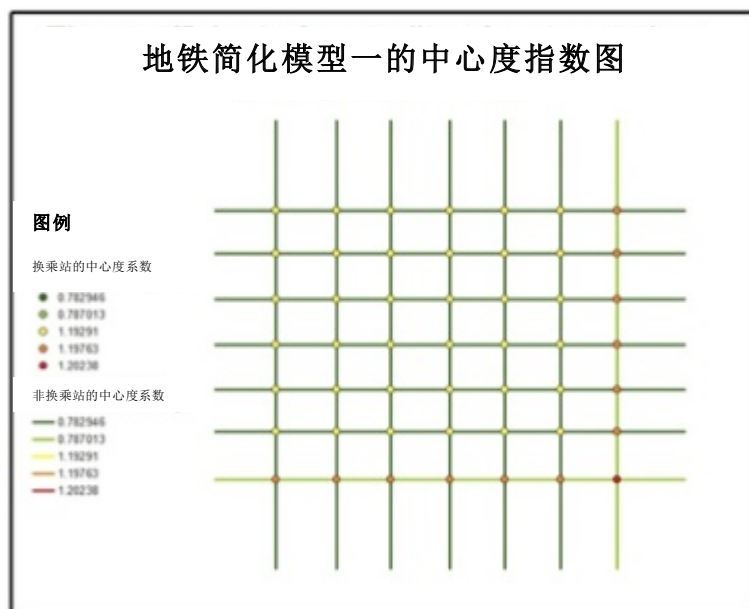


图 5.20 地铁简化模型一的中心度指数图 (©王曦)

### 5.4.2 简化模型二的中心度分析

简化模型二还是保持了 14 条地铁线路以及 303 个地铁站点，在模型一的基础之上，模型二将其中两条线路由栅格型改变为交叉对角线，由此地铁网络的换乘站由模型一的 49 个减少到了 37 个，每条地铁线路上的总站点数都为 19 个。不过值得一提的是，其中两条对角线上大部分的换乘站都是三条地铁线的换乘站，因此它们的中心度相比之前来说是有所提高的。如图 5.21 所示，为地铁简化模型二的中心度指数图，从图中我们可以观察到换乘站的中心度仍然要高于地铁线路上的非换乘站，而中心度最高的站点则为三条线路的换乘站，其次是两条对角线的换乘站。虽然说

两条交叉线路的设计有效的提高了换乘站点的中心度，但同时由于换乘站点总数的减少，使得这个网络模型的效率反而不如之前了，计算所得的地铁网络效率  $Eff$  为 0.827。

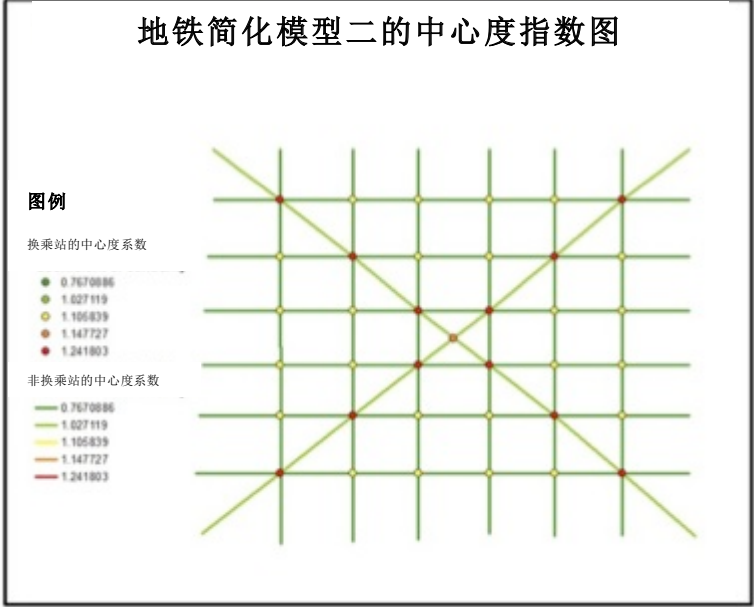


图 5.21 地铁简化模型二的中心度指数图 ( ©王曦 )

### 5.4.3 简化模型三的中心度分析

模型三的重点在于，在模型一的栅格网络基础之上，将模型二中的两条对角线路改变为了两条环线，与其他所有的线路相交。在仍然保持 14 条地铁线路以及总站点数 303 个的基础上，换乘站点比之前的两个模型都要多，增加为 84 个，这主要是因为两条环线的连接度非常的高。外环线上有 14 个站点，内环线则为 13 个，其余其他所有栅格型地铁线路上的站点数都为 16 个。从图 5.22 上我们可以观察到站点中心度的分布情况。虽然两条环线都与所有的地铁线路相交，但是由于其上的地铁站数有所不同，因此地铁站多一个的外环线上的换乘站点以及非换乘站都要比内环线上的换乘站点及非换乘站要高。而上个线路上的各种站点中心度都偏低一些。这预示着当连接度一样的情况下，影响中心度的就是站点数目了。该地铁网络模型计算出的效率  $Eff$  结果是 0.949，要明显高于之前的两个模型。

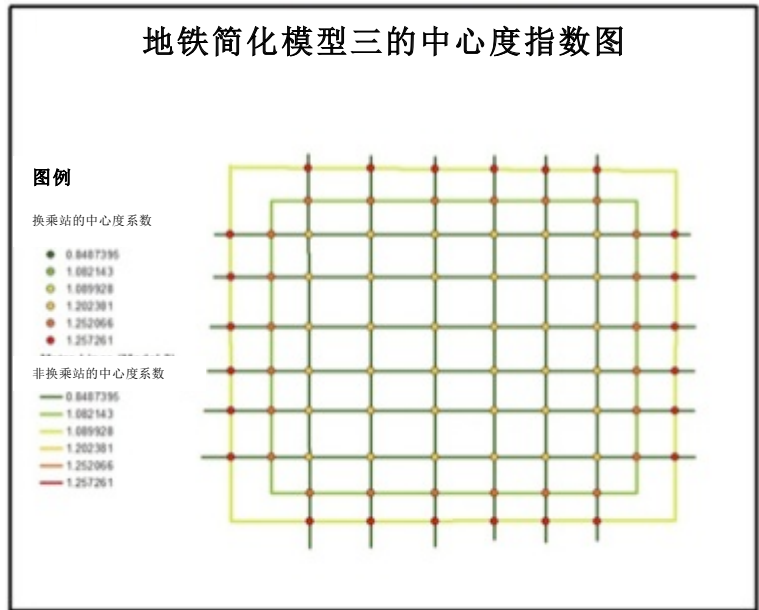


图 5.22 地铁简化模型三的中心度指数图 ( ©王曦 )

#### 5.4.4 简化模型四的中心度分析

模型四结合了之前三种模型的线路特征，由栅格型、对角线型以及环线型线路构成。它仍然由 14 条地铁线路，303 个地铁站点构成，其换乘站数目比模型三要少，但比模型一和模型二要多，共有 61 个换乘站点。从图 5.23 可以看到，中心度最高的是对角线型线路和栅格线型的换乘站点，因为它们是三条地铁线路的换乘站。其次是环线上的换乘站点，可以看到非换乘站方面，环线上的非换乘站中心度值最高，而栅格线路上的中心度值最低。通过此模型可以很好的观察到不同类型的地铁线路在地铁网中的中心度。此地铁网络模型的效率  $Eff$  是 0.910668。说明它整体优于模型一和模型二，但是没有模型三的效率高。由此看出有更多的换乘站点才能够提高地铁网络的综合效率，从这几个模型中的地铁线路类型来看，最能有效增加换乘站的是环线型线路。不过模型四也有其优势，因为它所采用的地铁类型比较多，这样可以发挥各个线路的功能，更好的为不同城区的人口服务，而此模型的整体效率又不算低，因此在做地铁规划时可以作为一个很好的参考。

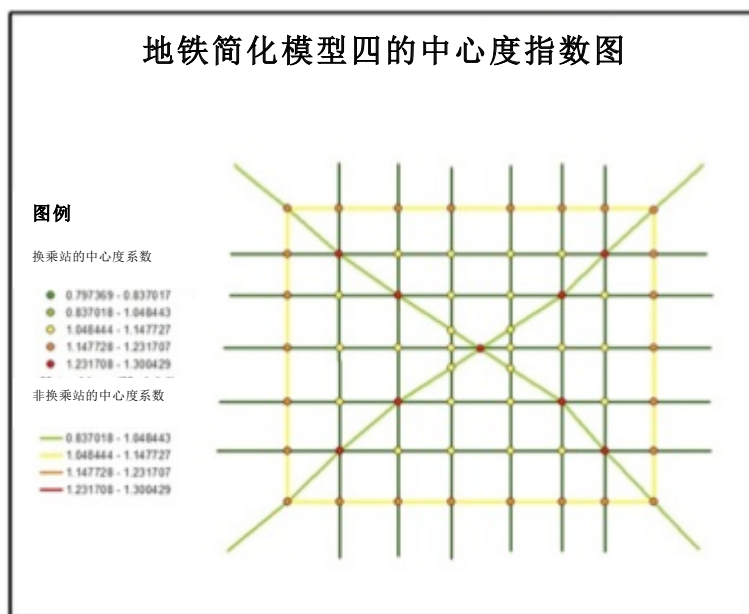


图 5.23 地铁简化模型四的中心度指数图 ( ©王曦 )

#### 5.4.5 简化模型五的中心度分析

在上面的四个简化模型中，地铁线路的总数（14 条）和地铁站总数（303 个）都是相同的，唯一有所变化的参数，就是换乘站点的个数。从前几个模型的分析结果我们可以观察到，某些地铁线路类型如直径穿越型、内环线型等可以提高某些换乘站点的中心度，但是就地铁网络的效率指数来说，还是取决于换乘站点数量的多少：当换乘站点增加，则效率指数提高；当换乘站点减少，则效率降低。

例如模型一和模型二相比较，虽然直径穿越型线路的加入明显提高了几个换乘站点的中心度，但由于模型二的换乘站点数目由 49 个降为 37 个，因此效率指数也有所降低。而模型四与模型三相比，虽然由更多种类的地铁线型所构建而成，但其换乘站点数目也由 84 各减少到了 61 个，相应的效率指数也有所降低。而模型三是所有四个简化模型中换乘站点数量最多，同时也是效率最高的一个模型。

为了证明这一假设，我们进一步设计了简化模型五，该模型同样拥有 14 条地铁线以及 303 个地铁站点，并且它使基于简化模型三的一个改良模型，即在模型三的基础上，增加了两条内环线内部的换乘站点数目到 96 个。模型三的两条内环线型内部主要是栅格形式相交的水平以及垂直地铁线路，而水平及垂直线路各自之间并没有换乘。在模型五中，则增加了原本平行的线路之间的换乘。



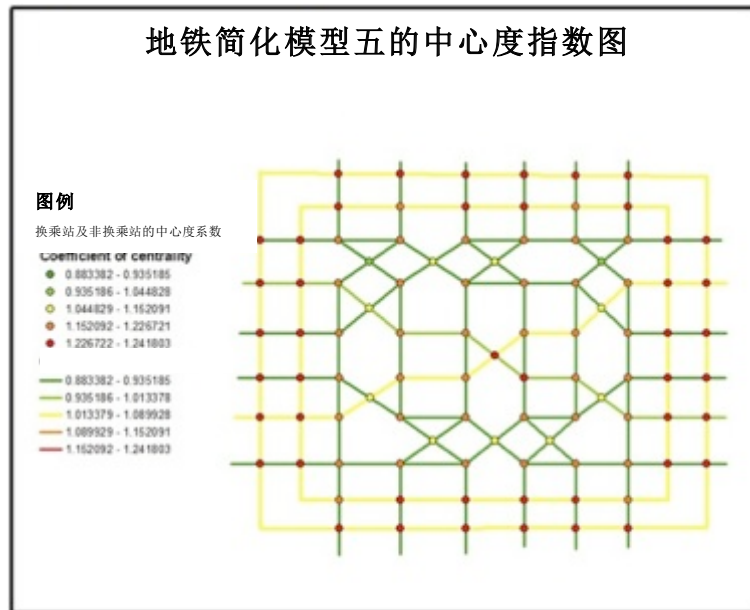


图 5.24 地铁简化模型五的中心度指数图 ( ©王曦 )

如图 5.24 所示，为简化模型五的中心度计算结果。从图中可以观察到，中心度最高的仍然是两条内环线型上的换乘站点。此外，内环线型内部的某些换乘站点以及地铁线路的中心度也有所提高。最后计算所得的地铁网络换乘效率值  $Eff$  为 1.07，相对于模型三的换乘效率值果然有所提高。这就说明，在地铁线路以及地铁站总数不变的情况之下，增加换乘站点数目可以提高整个地铁网络的换乘效率值。

## 5.5 巴黎地铁网络模型

通过比较几个基本的地铁网络模型，我们发现地铁线的中心度和连接度之间有一定的一致性，这种一致性也在上一章对巴黎地铁中心度的研究中得到了印证（如图 5.25）。通过对这种关联性的发现，我们可以采用有相同的连接性的模型来模拟巴黎地铁网络。

表 5.5 巴黎地铁线路的连接度

线路	1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	6 号线	7 号线
连接度	11	10	10	13	10	11	11
线路	8 号线	9 号线	10 号线	11 号线	12 号线	13 号线	14 号线
连接度	12	12	8	9	9	10	10

如表 5.5 所示为巴黎地铁各线路的连接度情况，根据这些连接度指标，我们可以对巴黎地铁进行模拟。这一节中，我们将对两个巴黎地铁网络模型进行中心度分析，比较其分析结果，并以此进一步来观察地铁网络设计中存在的一些规律。

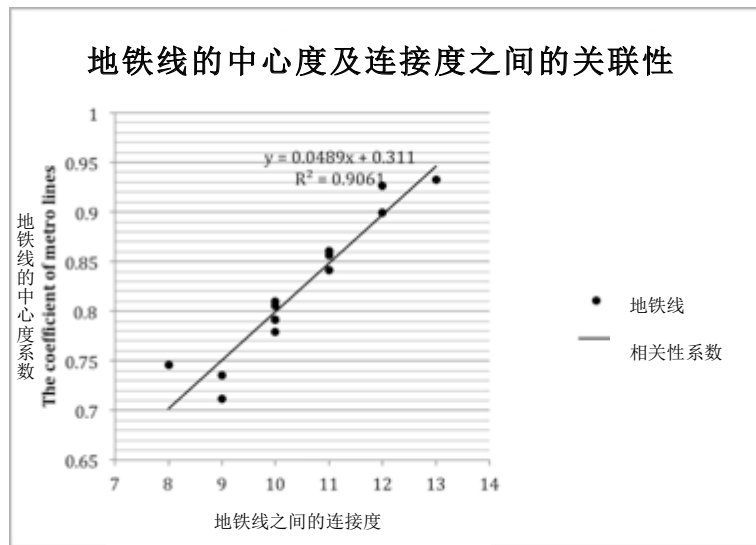


图 5.25 地铁线的中心度及连接度之间的关联性 (©王曦)

### 5.5.1 巴黎地铁网络模型一的中心度分析

在四个简单模型的基础上，我们进一步将模型复杂化，一边使它可以更加接近于巴黎的地铁网络现状。在巴黎地铁模型一中，我们除了可以看到栅格型网络以及对角线的地铁线型之外，还可以看到半环线型，以及不同的地铁线路在地铁网络周边相交，这就类似于巴黎地铁网络中在巴黎市郊相交的4号线和13号线，以及9号线和10号线等等。该地铁模型仍然以巴黎地铁为范例，拥有14条线路以及地铁总是为303个，其中换乘站为53个，除了两条对角线上有17个站点之外，其余各条线路上有18个站点。图5.26为该地铁模型的中心度指数图。从图中我们可以观察到，换乘站的中心度仍然要优于地铁线路上的非换乘站。中心度最高的换乘站为地铁网络中心的两个对角线以及一条水平线路的交点，其次则是两条对角线上其他拥有三条线路的换乘站。非换乘站中心度最高的也主要集中在两条对角线之上，值得一提的是，对角线上的这些非换乘站比网络外侧的某些换乘站的中心度还要高一些。该模型计算出的效率指数 Eff 是 0.923，比简单模型中的模型三要略低一些，但比其他三个模型的效率指数都要高。

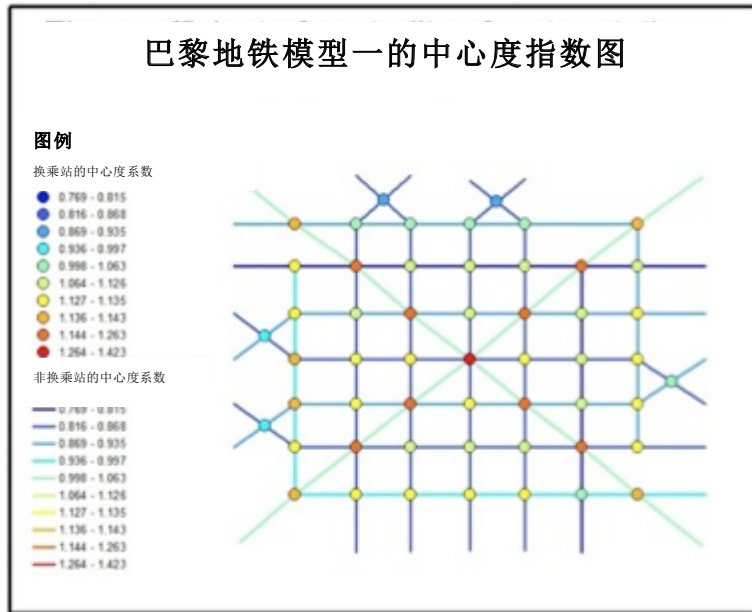


图 5.26 巴黎地铁模型一的中心度指数图 ( ©王曦 )

### 5.5.2 巴黎地铁网络模型二的中心度分析

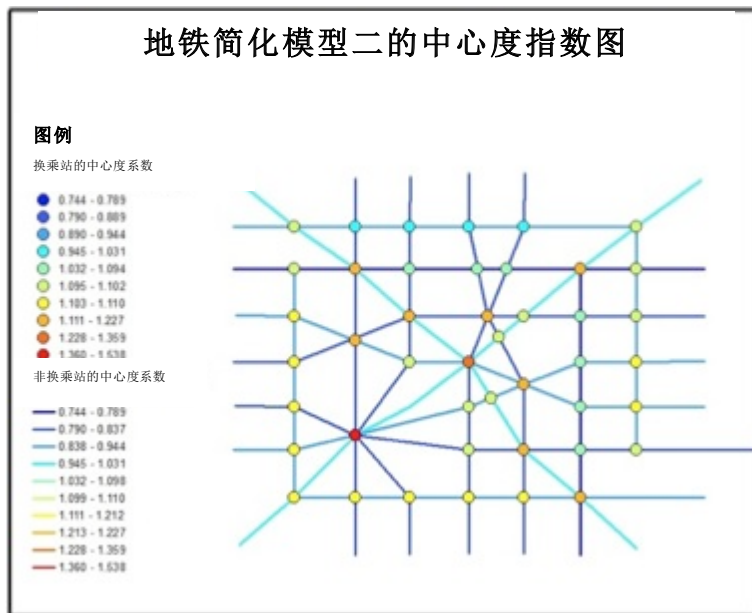


图 5.27 巴黎地铁模型二的中心度指数图 ( ©王曦 )

在巴黎地铁模型二中，我们设计了更为复杂的线路换乘，而该模型也是最为贴近巴黎地铁网络现状的模型。我们可以看到两条半环线型、许多条直线穿越型以及切线型线路，并且在该地铁模型中还很明显的出现了两个大的换乘中心，分别有四条和五条线路从此经过，很像是巴黎地铁网络中的 Châtelet 站，或者 République 站等等。这个地铁模型的换乘站一共有 44 个，比模型一中的换乘站数量少一些。除了

两条对角线分别有 15 个以及 16 个站点之外，剩余的地铁线路上各有 19 个站点。如图 5.27 所示，为该地铁模型的中心度指数图。从图中我们可以看到中心度最高的即为两个大的换乘中心，而非换乘站方面仍然是两条对角线上的非换乘站点中心度比较高。该地铁模型所计算出来的效率指数 Eff 是 0.89。可见虽然增加大的换乘中心能够提高个别站点的中心度，但是整体网络的效率指数还是取决于换乘站点的多少。

对巴黎地铁模型的研究说明我们可以通过中心度和效率指数的分析来比较不同的地铁网络设计方案。包括比较地铁线路上的非换乘站点以及地铁网络中的换乘站点。虽然这些模型拥有相同的地铁线条数（14 条）以及相同的总地铁站数，但是换乘站点在网络中的重要性会因为地铁线路的类型以及地铁线路之间连接的方式而产生变化。在此研究中，巴黎地铁模型一的设计方案可能是能够在市域范围内提供均等可达型的地铁方案，而模型二的设计方案可以为城市中心枢纽（如火车站）等提供更有效的服务。这些地铁模型研究可以为我国城市地铁网络发展提供一些有效的参考，如兴建中的武汉地铁网络等。

## 5.6 本章小结

本章主要对巴黎地铁网络现状进行了不同层面的分析。在本章开头，我们首先对其站点分布以及地铁线路与道路网络的关系做了一定的分析，巴黎城市内部的地铁站点分布十分紧密，而地铁线路与道路网络之间也有一定的相关性。另外，我们根据 Vuchic 对于的地铁线路类型定义，我们分析了巴黎地铁 16 条线路（包括 3bis 线和 7bis 线）在地铁网络中的形态特征以及功能。

在接下来的部分中，我们对巴黎地铁站进行了中心度分析，对地铁网络中站点的结构中心度(Structuality)进行了评估。另外，由于巴黎地铁站点的交通量也受到了远程快轨 RER 的影响，我们在之后的分析中将与地铁站有换乘的 RER 站点也考虑了进来。分析表明，地铁站点的中心度与其入站交通量密度有很好的一致性。而换乘站点一般比非换乘站点有更高的中心度，尤其是与 RER 区域快铁有换乘的站点。这是由于 RER 区域快铁从巴黎郊区带入了大量的客流。

同时，我们以巴黎地铁线路中六个基本类型的地铁线路为例，分析了这些类型的地铁线路上不同站点的入站交通量密度的变化趋势，同时比较了地铁站点的中心度和入站交通量密度之间的相关性。我们发现随着地铁线路类型的改变，其交通量分布的特征也会有所不同。而在多数地铁线上都可以观察到“水泵效应”，即换乘站点周边的站点的中心度和交通量密度都呈现出下降趋势。这一现象同时也在对换乘站点及其周边的非换乘站点的比较中显现出来。通过对地铁站点进行结构中心度(Structuality)分析，可以帮助规划师找出地铁网络中，或者是设计方案中相对重要的“核心”站点，从而方便方案之间的比较。

在对巴黎地铁网络进行分析之后，我们进一步进行了抽象性的研究，即设计了四个基本的地铁网络模型，并且通过中心度的分析，来了解不同地铁网络的特性、地铁站点的中心度以及地铁网络的换乘效率等。这些模型采用了与巴黎地铁一致的参数设置，有 303 个地铁站和 14 条地铁线路（不包括 3bis 线和 7bis 线）。通过这些模型的分析 and 比较，我们发现这四个模型中换乘效率最高的是模型三，这个模型中的地铁线路类型虽然没有模型四丰富，但由于它的换乘站点数量优势明显，因此最终所得的地铁网络换乘效率值也是四个模型中最高的。之后我们再针对模型三进行了进一步的改善，使得环线型网络内部的直线穿越型线路间有更多的换乘。结果显示，基于模型三改善后所得的模型五的换乘站点有所增加，而其地铁网络的换乘效率也得到了提高。这进一步证明换乘站点数目的增加会带来地铁网络换乘效率的提高。

在之前章节的分析中，我们对巴黎地铁线路的中心度和连接度（有直接换乘的地铁条数）的相关性进行了分析，并且发现两者是高度相关（相关系数  $R^2$  为 0.945）。在这个结论的基础上，我们根据巴黎 14 条地铁线的连接度而设计了基于巴黎地铁网络的两个模型，并且对两个模型进行了分析和比较。最后的分析结果表明，这两个模型分别代表了不同的地铁网络方案：模型一是为城市提供均衡的可达性的方案，而模型二则是在市中心建立枢纽的方案。虽然模型二的整体地铁网络换乘效率没有模型一高，但模型二中中心度最高的几个换乘站点的中心度相比模型一而言是有所提高的。两个巴黎地铁模型中并没有哪个模型更胜一筹，而是需要规划师根据具体情况来分析，怎样为不同的城市设计出更为合适的地铁网络。通过这些地铁模型研究，我们发现可以利用中心度分析对不同的地铁设计方案进行分析和比较，找到地铁网络中的重要站点，最终为地铁网络设计服务。

总的来说，我们以巴黎地铁现状网络为例进行了一系列分析和比较，发现结构中心度 (Structuality) 能够帮助解读地铁网络中的交通流量的分布。而通过对地铁模型的研究，我们发现在地铁站点总数不变的情况下，提高换乘站点数能够有效提高地铁网络的换乘效率。对于城市规划师及决策者来说，中心度分析方法能够提供一个在规划阶段比较不同地铁网络设计方案的有效工具。

## 6 对武汉地铁网络现状及规划的相关分析

### 6.1 武汉市的基本情况

#### 6.1.1 城市概况

武汉市是湖北省省会，中国十大城市之一，是坐落于中部的中心城市，重要的工业基地、教科基地和交通枢纽，素有九省通衢之称。以武汉为中心及其周边的八个城市，包括黄石、鄂州、黄冈、孝感、咸宁、仙桃、天门和潜江构成了武汉『1+8』城市圈。虽然武汉城市圈的总面积不到全省的三分之一，却集中了湖北省一半的人口以及六成以上的 GDP，是湖北经济发展以及中部崛起的重要战略支点。邻省的大中型城市如河南省的郑州市和洛阳市、湖南省的长沙市以及江西省的南昌市和九江市都在离武汉 600 公里的范围之内 (Han and Wu 2004)。



图 6.1 武汉的市辖区 (Han and Wu 2004)

长江和汉水将武汉一分为三，形成了武昌、汉口、汉阳三镇鼎力的格局。武汉淡水资源十分丰富，除长江和汉水之外，市内湖泊众多，在其市区面积中，水域面积占约四分之一。武汉市是我国比较典型的多中心城市，主要有汉口的江汉路、汉阳的钟家村以及武昌司门等几个并行的城市中心区。历史上，由于地理环境的限制及政治等原因，武汉三镇曾经多次分分合合，直到解放后才重组为武汉市。城市发展之初，这三个生长核是一种相互独立、自成体系且规模相近的关系。由于我国实行的以计划经济为主题的社会主义经济体制，政府对经济发展起着重要的管理和干



预作用。自 1928 年国民革命政府确立汉口作为武汉市政府驻地，以及解放后武昌成为湖北省政府驻地之后，这省市两级人民政府加快推进了武昌汉口两个中心区的发展 (顾永清 1991)。

从行政区划上来说，武汉被分为 13 个市辖区，其中有 7 个主城区以及 6 个远城区（见图 6.1）。中心的主城区主要为建成区，其中洪山区的非建成区面积要相对大一些，整个中心城区比远城区面积要小。市辖区下面又分为街道和社区居委会。在本研究中，研究区域集中于武汉市的 7 个主城区，包括：江岸区、硚口区、江岸区、汉阳区、青山区、武昌区和洪山区。如表 6.1 所示，为武汉市行政规划的相关统计数据。

表 6.1 武汉市的行政区划

主城区	街道	社区居委会
江岸区	17	170
硚口区	11	139
江汉区	13	116
汉阳区	11	117
青山区	10	120
武昌区	13	232
洪山区	13	158
总数	88	1052

\*数据来源：武汉市国土资源和管理局信息中心

### 6.1.2 城市增长

根据统计数据，武汉市市域面积为 8494.41 平方公里，市区城镇常住人口为 802 万（2014 年）。武汉市的建成区面积约为 214.22 平方公里。根据户籍制度，519 万居民为非农业人口，组成了 64.4%城市化水平 (Wuhan Statistical Bureau 2006)。

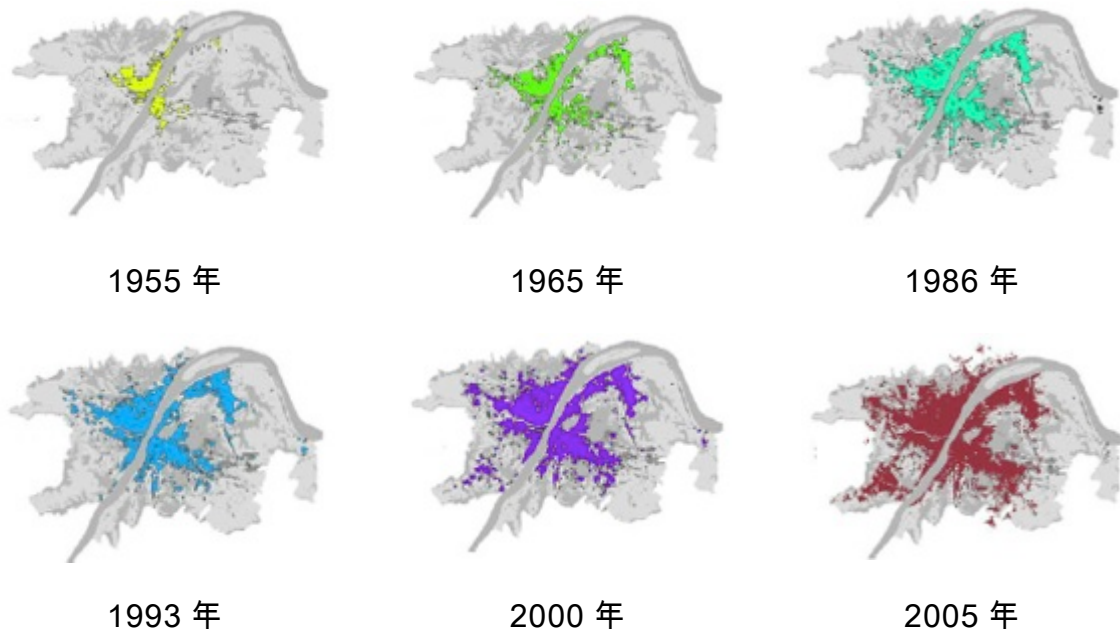


图 6.2 武汉市中心城区从 1955 年至 2005 年的建成区面积变化 (Deng 2009)

图 6.2 显示了武汉市中心城区在 1955 年至 2005 年之间的建成区面积变化。首先，城市的建设从汉口和武昌的老城区开始，在 1955 年到 1965 年之间从中心城区扩展到了城市边缘地区。随着中国第一轮的外商投资潮（1980 到 1991），建成区沿着工业基地而逐步扩大。在 1993 年之后，武汉进入了一个城市发展的新时代，其标志主要为城区内部的再发展。更重要的是，此阶段的城市增长从工业转移到新城区的多功能发展。随着越来越多的商业、娱乐业和房地产业的发展，以及城市基础设施的优化，带动了中心城区的改变。武汉的大型基础设施建设项目包括新天河国际机场、汉口火车站，新武汉站都是在 1993 年到 2000 年之间建成的。

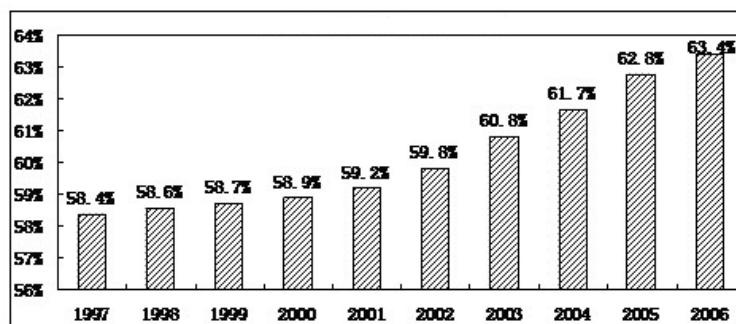


图 6.3 武汉从 1997 年到 2006 年的城市化率 (Deng 2009)

2006 年，武汉的城市化率已经达到了 63.4%（见图 6.3）。由人口变迁、工作机会以及经济行为造成了武汉中心城区的市郊化。城市扩张受到以下几个因素的影响：（1）城区内部的人口压力；（2）郊区低土地价格对工业的吸引；（3）商业及服务业随着人口迁移的转移。武汉的净人口迁移率已经摆动到了 6%。

### 6.1.3 道路网络

武汉市规划局信息中心的 GIS 数据显示，武汉市道路基础设施主要有三个层次（见图 6.4）：主要道路、次要道路和支路。考虑到交通拥堵的问题，支路又根据其地理位置被划分为两个类别：城区支路和城郊之路。在此研究中，道路网络将用于计算地铁站点的服务半径。

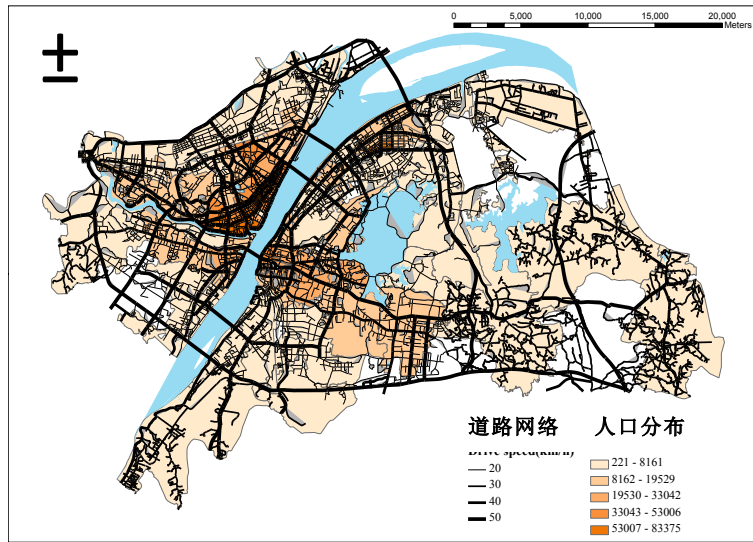


图 6.4 四个层次的道路网络 (武汉市规划局信息中心, ©王曦)

## 6.2 武汉市地铁网络现状及规划的基本特征分析

武汉市早在 20 世纪 80 年代末就开始研究地铁了。1991 年，由于发展需要，位于如今京汉大道沿线的老京广铁路线被外迁到了发展大道上。当时的武汉市政府为了更好的利用原有铁路线，便设计了武汉市最早的地铁，但当时并不是出于解决交通拥堵的考虑而设计的。之后，武汉市在 1993 年开始编制，1995 年正式提出了第一轮武汉市轨道网络规划。

2003 年，中央出台 81 号文《国务院办公厅关于加强城市快速轨道交通建设的通知》，该文件为全国各城市的轨道交通建设设置了一道门槛，即只有城市人口在 300 万以上，GDP 总额达到 100 亿的城市才发展轨道交通。武汉市在 2003 年编制第一轮城市建设规划时，才勉强符合条件。武汉由此开始进入轨道交通时代。

如今，武汉是中国即北京、天津、上海和广州之后的第五个拥有地铁系统的城市。武汉市的地铁规划旨在连接被长江和汉江分割开来的武汉三镇，以便满足城中心区日益增加的交通需求并服务于其周边的卫星城市。它从 2004 年开始投入运营。到 2014 年，地铁 1 号线、2 号线以及 4 号线的一部分已经投入使用，该地铁网络全长 73.4 公里，共有 62 个站点。根据《武汉市城市快速轨道交通建设规划》，7 条线路总长 215.3 公里的地铁线路将在 2017 年之前完工。地铁网络将覆盖武汉中心城区。

地铁系统将分担武汉市公共交通客流量的 35%。根据 2049 年的长期地铁规划，武汉将建设总长 860 公里的 25 条线路，其中包括 12 条城市地铁线路和 13 条区域快轨。

### 6.2.1 地铁网络 2014 年现状分析

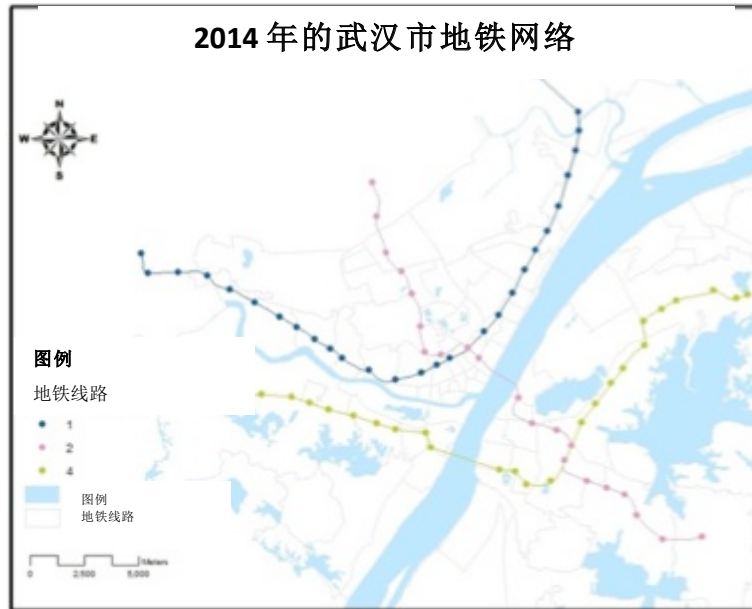


图 6.5 2014 年的武汉市地铁网络 (©王曦)

如图 6.5 所示，为武汉市 2014 年已建成的地铁网络图，其中包括 1 号线、2 号线以及 4 号线。1 号线作为武汉市最早开通的地铁线路被设计为高架线，其线路沿着京汉铁路的旧址、如今的京汉大道而建，沿途经过东西湖区、硚口区、江汉区、江岸区和黄浦区，共有 29 个站点。该线路西起东吴大道，东至汉口北站，共分三期建设，分别于 2004 年、2010 年和 2014 年逐步开通。2 号线全程位于地下，形式方向为西北/东南方向，从地下穿越长江，连接汉口与武昌地区，沿途经过汉口（江汉区和江岸区）以及武昌（武昌区和洪山区）。该线路共设车站 21 座，平均间距为 1376 米，最大间距为江汉路站到积玉桥站间的跨江间距 3360 米连接了汉口和武昌，是武汉市第一条横贯长江的地铁线。4 号线一期于 2013 年年底开通运营，连接了武汉火车站和武昌火车站，坐落于武昌区，共设车站 15 座，平均站点间距为 1099 米。4 号线二期则在 2014 年年底投入运营，自武昌站到汉阳黄金口站，共设车站 13 座，大部分为地下线路，行驶方向为东西方向，连接汉阳与武昌地区。实现了武昌和汉阳地区的连接。

如表 6.2 所示为 2014 年各地铁线路的一些主要特征。从地铁线路的类型上来看，1 号线、2 号线和 4 号线分别贯穿了武昌、汉口和汉阳地区的市中心，因此均为直径穿越型线路。从图中我们可以看到，武汉市建设的这三条线路首先服务了武汉三镇的城市副中心，并且汉口和武昌都分别有两条线路从其城市副中心穿过。这三

条线路构成了武汉市地铁网络结构的雏形。

表 6.2 武汉市 2014 年地铁线路的特征

地铁线路	线路类型	无换乘的线路	所处区域	是否过江	线路总长 (公里)
1 号线	直径穿越型	4 号线	汉口	否	28.5
2 号线	直径穿越型	无	汉口、武昌	是	27.7
4 号线	直径穿越型	1 号线	武昌	否	33.2

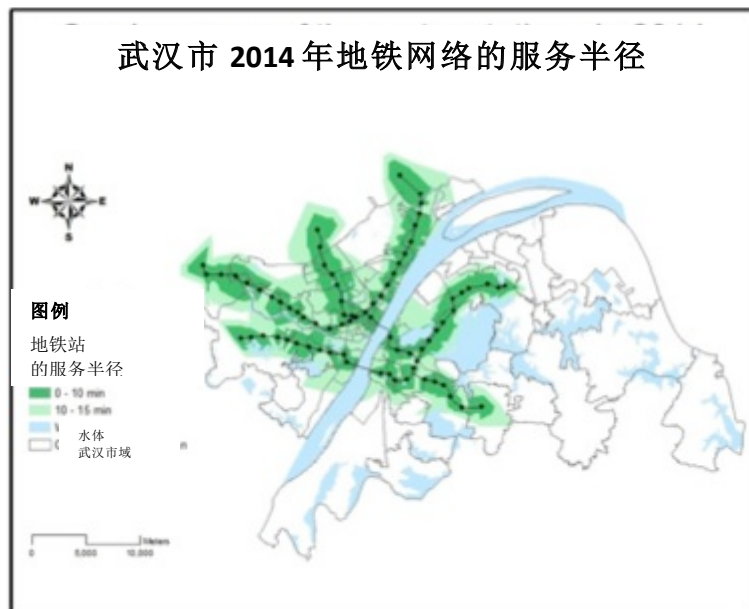


图 6.6 武汉市 2014 年地铁网络的服务半径 (©王曦)

如图 6.6 所示，我们根据武汉市 2014 年地铁网络图做了地铁站的步行可达范围分析，进而得出了地铁站在 10 分钟到 15 分钟之内的步行距离的服务半径。图中深绿色为 10 分钟内的步行距离范围，而浅绿色为 10 分钟至 15 分钟之内的步行距离。从图中我们可以看到汉口地区的覆盖率要远远高于武昌地区的覆盖率，而武昌地区除了水域面积较大之外，仍然还有大片区域不能够在 15 分钟抵达地铁站。

### 6.2.2 地铁网络 2017 年规划分析

如图 6.7 为武汉国土资源和规划网上公布的《武汉市城市轨道交通近期建设规划（2010-2017 年）》，该规划以武汉市目前正在运营的 3 条地铁线为基础，以远景年 12 条轨道交通线网为依据，将延伸轨道交通 1 号和 2 号，并新建 3 号以及 6 号、7



号、8 号线的一期工程。到 2017 年武汉市地铁网络总规模将达到 215.3 公里，其中新增线路长约 142.6 公里，基本形成覆盖武汉三镇的轨道交通网络体系。



图 6.7 武汉市城市快速轨道交通建设 2017 年规划  
( ©武汉市国土资源和规划局 )

1 号线将从东吴大道站延伸至金山大道站共一站，2 号线南延线则从光谷广场站开始沿珞瑜东路向东延长，至城际铁路流芳火车站。地铁 3 号线行驶方向为西南/东北方向，将从地下穿越汉江，是连接汉口与汉阳地区的骨干线路，途径汉口的江岸区、江汉区、硚口区以及汉阳的汉阳区和蔡甸区，重点解决武汉经济开发区、汉口西王家墩 CBD、后湖片区与主城区的交通连接，支撑城市空间拓展。该线路起始于沌口经济开发区，项目线路全长 30.1 公里，途径 24 座站点。于 2015 年完工，地铁 2 号线和 4 号线形成了连接武汉三镇汉口、武昌和汉阳的环线。

地铁 6 号线一期工程南起武汉体育中心，北至金银湖，跨越汉口与汉阳两个地区，贯穿了东西湖区、江岸区、江汉区和汉阳区，全程共设 27 座车站，它是继地铁 3 号线之后又一条跨越汉江的地铁线路，连通了体育中心、博览中心、汉阳商业中心、汉口商业中心和站北居住组团等地区，是沌口经济开发区、汉阳区、汉口区和东西湖区客流联系的主通道，其定位为大运量等级的线路。该线路为全程地下线，平均站点间距为 1368 米。6 号线二期工程将在之后的规划中实施。

7 号线是继地铁 2 号、4 号和 8 号线之后又一条过长江的地铁线，全程设 19 座地铁站，平均站点间距为 1655 米，南起南湖大道，北至东方马城，跨越汉口和武昌两个地区，南北方向贯穿武昌区、洪山区、江汉区、江岸区和东西湖区，7 号线是武汉首条开工建设的市域快线，其特点是站点间距大、线路长且行驶速度更快。地铁 8 号线一期工程跨越汉口与武昌两个地区，南北方向分别贯穿武昌区、洪山区、江岸区和东西湖区，南起梨园，北至三金潭，全长 16.55 公里，共设 12 座地铁站，平均站点间距为 1379 米。8 号线二期工程属于远期建设路线，预计在 2017 年之后



开工。



图 6.8 武汉市规划的 2017 年地铁网络 (©王曦)

2017 年武汉市地铁网络的规模在原有的基础之上扩大了一倍，形成了真正意义上的网络（如图 6.8）。从表 6.3 可以看出大部分的地铁线路都是直径穿越型线路。由于被长江和汉江分隔为“三镇”以及另外一些历史因素，武汉市是一个多中心城市，在武昌、汉口、汉阳均有一个城市中心。将地铁线路设计为直径穿越型，让地铁线穿过一个或多个城市中心，有利于不同区域之间的公共交通出行，加强武汉三镇之间的联系，同时起到整合城市结构的作用。切线型 8 号线则作为网络中的加强补充服务着汉口与武昌之间的出行。虽然经过三年的发展与 2014 年相比，武汉的地铁网络已具备一定的规模，但网络设计中始终没有出现能够起到整合网络的内环线型地铁线。地铁网络中形成的环线都是由三条或三条以上直径穿越型地铁线相交而形成的。并且形成的环线都比较小，主要连接了各个城市中心区。

表 6.3 武汉市 2017 年规划地铁线路的特征

地铁线路	线路类型	无换乘的线路	所处区域	是否过江	线路总长 (公里)
1 号线	直径穿越型	4 号线	汉口	否	29.7
2 号线	直径穿越型	无	汉口、武昌	是	38
3 号线	直径穿越型	无	汉口、汉阳	是	33.2
4 号线	直径穿越型	1 号线	武昌、汉阳	是	33.4

6 号线	直径穿越型	8 号线	汉口、汉阳	是	33.5
7 号线	直径穿越型	无	汉口、武昌	是	31
8 号线	切线型	6 号线	汉口、武昌	是	16.55

从线路的分布情况来看（如表 6.3），服务于汉口的线路最多，一共有 6 条，而服务于武昌和汉阳的则各有 4 条和 3 条。除了 1 号线仅服务于汉口以外，其它线路都穿过了两个城市区域。从换乘的情况来看，2 号线、3 号线和 7 号线的连接度最高，与其它所有线路都能够实现换乘。

如图 6.9 所示，为武汉市 2017 年地铁站在 10 分钟到 15 分钟之内的步行距离的服务半径分布。图中深绿色为 10 分钟内的步行距离范围，而浅绿色为 10 分钟至 15 分钟之内的步行距离。从图中我们可以看到，汉口和汉阳地区的大部分区域已经可以通过步行到达地铁站，且汉口地区的大部分区域已可在 10 分钟步行到达地铁站。而武昌区部分却没有得到明显的改善，与 2014 年的地铁可达性相比，仅在沿江部分区域的覆盖率有所提高。



图 6.9 武汉市 2017 年地铁系统的服务半径 (©王曦)

### 6.2.3 地铁网络 2020 年规划分析

如图 6.10 所示，根据武汉市城市轨道交通近期建设规划（2009-2020 年），规划至 2020 年武汉市将形成总规模 439.1 公里的轨道交通网络体系，其中新增（延伸）线路 15 条、长度合计 226.9 公里，地下线 178.1 公里、地面线 1.7 公里、高架线 47.1 公里。本轮规划不仅解决了中心城区连接远城区的问题，也对中心城区现有骨

架线网进行了进一步完善，支撑两江四岸重点发展区建设。

在此近期建设规划中，5号线也被列入了计划。5号线全程位于武昌地区，途径武昌区及青山区，由于途径地区接近4号线，因而延后开工。该线路北起武汉火车站，东至青菱全长32.3公里，全部为地下线路，共设车站26座，平均站点间距为1281米。另外，此建设规划中还有8号线二期从梨园到野芷湖的线路，途经街道口，串联南湖的线路，该线路走向与二环线武昌段有所重叠。

9号线一期从植物园路到汤逊湖，也纳入规划中。但2014年3月，通过市政府常委会上报国家发改委的《武汉市第三轮轨道交通建设规划》中取消了9号线，这主要是由于从总体规模而言，同时期开建投融资困难，对城市影响较大，因此决定暂缓一些线路，而9号线的选址对用地环境要求很高，并且路线短将给运营造成困难，综合考虑之下决定暂缓9号线的建设，目前最终方案还没有定论。在此研究中，暂时保留原规划9号线的路径。



图 6.10 武汉市综合交通 2009-2020 年规划

( ©武汉市国土资源和规划局 )

此建设规划还提出10号线和11号线的建设。地铁10号线起点为常福，终点站阳逻，经过武汉经济技术开发区、王家墩、汉口火车站和武汉火车站等地，按照规划将同时穿越汉江和长江。地铁11号线西起于蔡甸柏林，东止于江夏左岭，全长约70公里，设站38座，这条线路贯穿武汉，连接蔡甸、四新城市副中心、武昌火车站、鲁巷城市副中心。可实现汉阳中心区于武昌中心区的快速直达，是引导城市东西部新城组群发展、支撑城市副中心建设的主题线路，也是武汉市东西走向的轨道交通大动脉。如同地铁7号线，地铁10号线和地铁11号线也是两条市域快线，即拥有站距大、线路长，速度快的特点。此三条市域快线在中心城区相扣成环，将城市副中心、客运枢纽、王家墩中央商务区以及中央活动区等紧密衔接，实现三镇快速直达一体化均衡发展。另有地铁12号线发自古田，终点站为武湖，具体细节还在

规划当中。

根据规划，到 2020 年武汉将会有 5 座客运火车站，并都将通过地铁网络实现无缝换乘。其中武汉站主要停靠南北走向的京广高铁；汉口站服务于东西走向、沿长江流域的沪汉蓉动车等；武昌站因紧临城市内环线，其客运功能将受到控制，而主要停靠普通客车。除以上 3 座火车站外，武汉还将新建新汉阳火车站及流芳火车站。其中，新汉阳火车站将成为武汉西部综合交通枢纽，承担西安—武汉—福州等方向的列车，并且服务省内武汉到天门、潜江等方向的城际铁路；流芳站则是武咸、武黄城际铁路的重要节点。

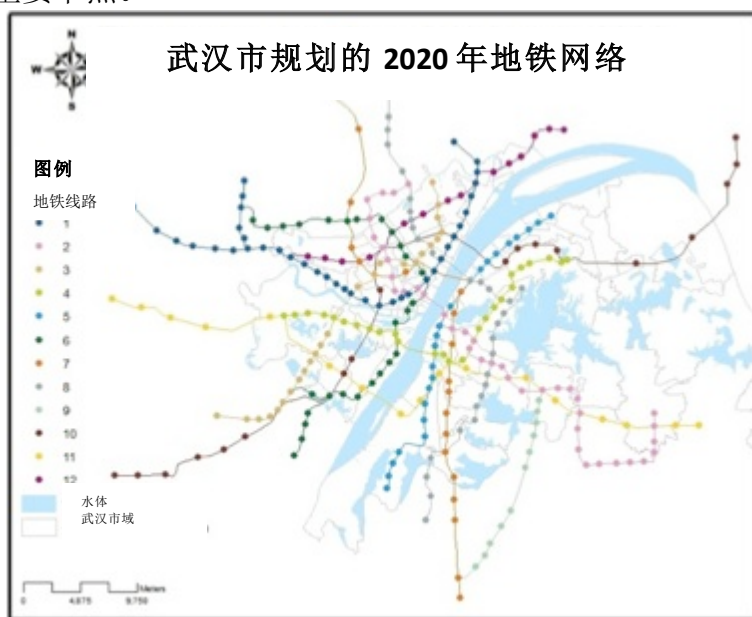


图 6.11 武汉市规划的 2020 年地铁网络 (©王曦)

到了 2020 年，武汉市地铁网络的规模还将进一步扩大，除了已有线路的延伸以外（如 1 号线、2 号线、6 号线、7 号线和 8 号线），还将新建 5 号线、9 号线、10 号线、11 号线和 12 号线等五条地铁线路（如图 6.11）。

从表 6.4 可以看出，到 2020 年，武汉市地铁网络规划中的主要线路类型仍然是直径穿越型。其中 1 号线和 6 号线在线路的一端新建了一个支线，同时成为了树杈型地铁线。另外，8 号线、9 号线和 12 号线为切线型，距城市中心有一定距离。在所有线路当中，换乘相对较少的为仅服务于一个城区的线路，如 1 号线、5 号线、9 号线和 12 号线。其中换乘最差的为 9 号线，仅与三条地铁线有换乘，同时其选址也相对较偏僻，主要是坐落于武昌区比较偏郊区的地段，它连接了 7 号线的末端与 2 号线和 11 号线的中转站，在武昌区形成了一个局部的小环线。

而换乘最佳的则是 2 号线、7 号线和 10 号线，与所有其它地铁线路均有换乘。这三条线路是整个地铁网络中最长的几条，其中 10 号线是整个网络中唯一跨越了汉阳、汉口和武昌三个城区的线路。从整体上来看，服务于汉口地区和武昌地区的线路均达到了八条，而服务汉阳地区的线路则为五条。到了 2020 年，武汉地铁规划中

仍然没有包括内环线型和辐射线型在内的其它类型的地铁线路。不过，仍有不少其它类型的线路通过相交组成了地铁网路内部一些小的环线，例如4号线和11号线在武昌和汉阳区域组成的环线，又如12号线与1号线、3号线和7号线相交在汉口城区形成的多个小环线等等。地铁网络中为数不多的换乘站还是主要集中在城市中心区，整个网络基本覆盖了武汉市的主城区，连接了五大火车站，以及天河机场等交通枢纽。

表 6.4 武汉市 2020 年规划地铁线路的特征

地铁线路	线路类型	无换乘的线路	所处区域	是否过江	线路总长 (公里)
1 号线	直径穿越型、 树杈型	4、5、9、11 号线	汉口	否	29.7
2 号线	直径穿越型	无	汉口、武昌	是	53
3 号线	直径穿越型	5、9 号线	汉口、汉阳	是	33.2
4 号线	直径穿越型	1 号线	武昌、汉阳	是	36.3
5 号线	直径穿越型	1、3、6、9、12 号线	武昌	否	32.9
6 号线	直径穿越型、 树杈型	8 号线	汉口、汉阳	是	36
7 号线	直径穿越型	无	汉口、武昌	是	45.1
8 号线	切线型	6 号线	汉口、武昌	是	39.6
9 号线	切线型	1、3、4、5、6、8 号线	武昌	否	11.7
10 号线	直径穿越型	无	武昌、汉口、 汉阳	是	26.7
11 号线	直径穿越型	1、12 号线	武昌、汉阳	是	32.5
12 号线	切线型	4、5、11 号线	汉口	否	57



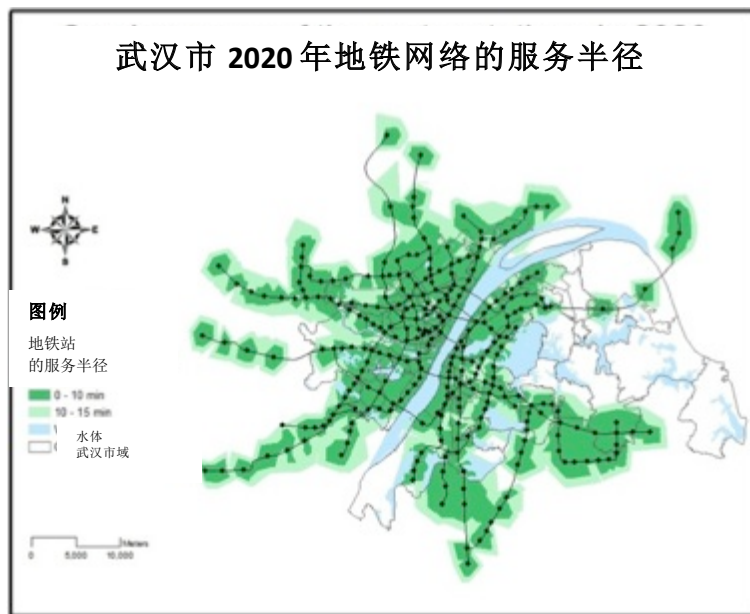


图 6.12 武汉市 2020 年地铁网络的服务半径 ( ©王曦 )

如图 6.12 所示为武汉市 2020 年地铁站在 10 分钟到 15 分钟之内的步行距离内的服务半径。图中深绿色为 10 分钟内的步行距离范围，而浅绿色为 10 分钟至 15 分钟之内的步行距离。从图中我们可以看到汉口和汉阳地区大部分区域可在 10 分钟步行距离之内可达，同时随着地铁线路向郊区的延伸，地铁的服务范围也扩展到了武汉市郊。而武昌地区相比 2017 年的地铁步行覆盖率也增加了许多，剩下没有被覆盖的地区主要是青山区和洪山区。

## 6.3 对武汉地铁网络的中心度分析

### 6.3.1 地铁网络 2014 年现状分析

2014 年，武汉市地铁网络的结构还比较简单，只有三条地铁线以及三个换乘站点。如图 6.13 所示为对该地铁网络中各站点的中心度分析结果。中心度最高的站点为 1 号线与 2 号线的换乘站循礼门站，其次则是 2 号线与 4 号线的两个换乘站点洪山广场站及中南路站。中心度最高的为地铁 2 号线，它与另外两条地铁线都有换乘。

根据之前对巴黎地铁系统的中心度分析，及其与交通量的比较可以得知其中中心度测量值能够从某种程度上反映站点的交通量。因此，通过对 2014 年武汉市地铁站点的中心度分析结果中我们可以推测，1 号和 2 号线的换乘站循礼门站有可能相比其他地铁站而言拥有更大的客流量。另外，洪山广场站和中南路站的客流量有可能也相对比较可观，且 2 号线上的客流量会比 1 号线和 4 号线更为显著。据统计，2 号线日均客运量近 42 万人次，最高客运量为 2013 年圣诞前夜的 71.61 万人次，而 1 号线的日均客流量已达到 22 万人次。4 号线与 2014 年 12 月 28 日开通试运行，其



规划初期也是按照日均 22 万人客运量而设计的。

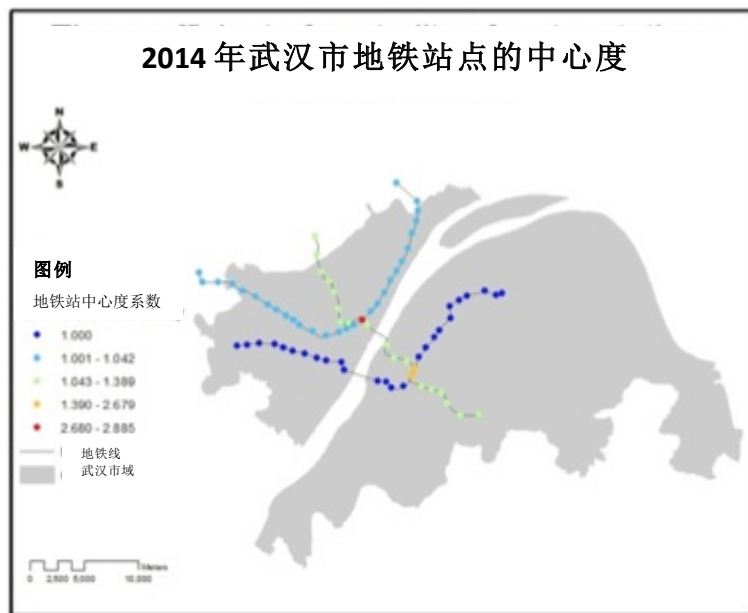


图 6.13 2014 年武汉市地铁站的中心度 (©王曦)

在 2014 的地铁网络架构中，换乘站只有 3 个，分别坐落在汉口和武昌地区的城中心，各地铁线路之间的连接性不高。即使暂且不考虑居民到地铁站的可达性，由于换乘较少，地铁出行的时间成本比较高。例如乘客若想从汉阳地区到汉口地区，乘坐地铁出行的情况下，只能先乘坐 4 号线到武昌转乘地铁 2 号线，之后再转乘地铁 1 号线。轻轨 1 号线沿着京汉铁路而建设，没有很好的契合汉口地区的交通流走向，而地铁 2 号线和 3 号线的主要功能则是局部上服务区域内部的交通，并且连接了长江两岸的三个地区，使得一直以来都存在的过江交通的压力得到了缓解。

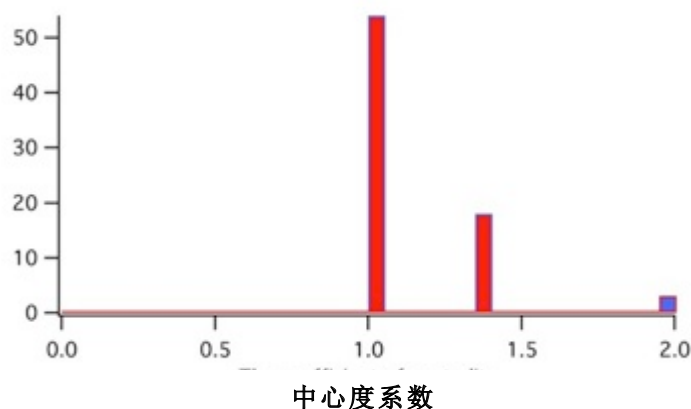


图 6.14 武汉 2014 年地铁站中心度系数直方图 (©王曦)  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站点)

如图 6.14 所示可以看到 2014 年武汉地铁站点的中心度分布情况，其中换乘站点的中心度要远高于非换乘站。而该地铁网络所计算出的效率指数 Eff 为 1.121。虽然效率指数偏高，由于该网络的地铁线路、总站点数等都非常有限，可能也是效率指数偏高的原因。

### 6.3.2 地铁网络 2017 年规划分析



图 6.15 武汉市 2017 年规划的地铁站点的中心度 (©王曦)

2017 年的地铁网络新增加了 4 条线路，而换乘站则由 3 个增加到了 23 个。如图 6.15 所示，2014 年地铁网络中中心度由最高的换乘站循礼门站降为了中心度第二高的站点之一，而中心度最高的站点则是 3 号、6 号和 7 号线的换乘站点香港路。中心度为第二级的站点有 11 个，基本上都是两条线路的换乘站点，中心度为第三级的则是剩下的换乘站点。中心度最差的线路为 1 号线、4 号线以及 8 号线的一期工程，而剩下的其它线路中心度则比较接近。

2017 年地铁网络中的各条线路之间的连接度有显著的提高，除了 1 号线与 4 号线以及 6 号线和 8 号线以外，其它线路之间的通行都只需要一次换乘来实现。如图 6.16 所示为地铁站的中心度系数直方图，从图上可观察到换乘站点的中心度普遍高于非换乘站。与 2014 年的地铁网络相比，地铁总数几乎翻了一倍（由 75 个增加到 149 个），换乘站点的个数也大幅增加（由 3 个增加到 23 个），线路则增加了 4 条。2017 年的地铁网络的换乘效率值 Eff 为 1.175，相比 2014 年有所提高。

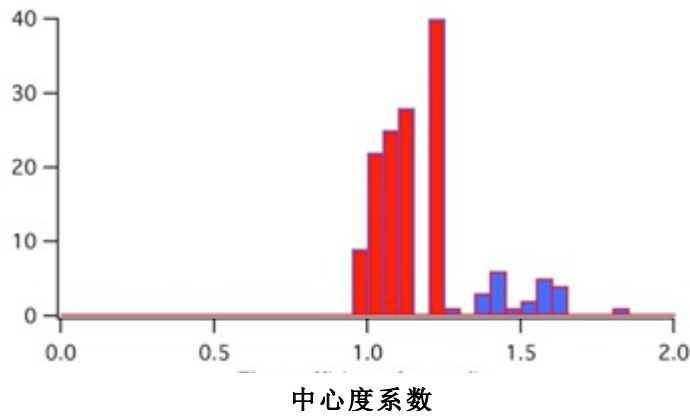


图 6.16 武汉 2017 年地铁站中心度系数直方图 ( ©王曦 )  
(蓝色表示换乘站, 红色为非换乘站)

从 2017 年的分析结果看来, 武汉的地铁网络初步形成, 其中汉口地区的网络覆盖及换乘效率较其它两个地区都比较高, 中心度最高的几个换乘站点大多分布在汉口地区。从地铁线路的中心度来说, 主要是贯穿汉口和武昌的 2 号线以及贯穿汉口和汉阳的 3 号线的中心度比较高。

### 6.3.3 地铁网络 2020 年规划分析

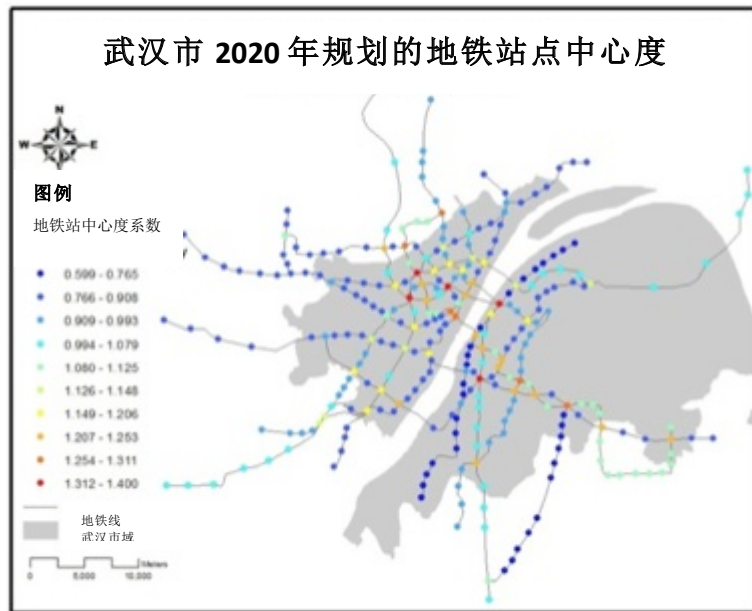


图 6.17 武汉市 2020 年规划的地铁站点的中心度 ( ©王曦 )

如图 6.17 为武汉市 2020 年地铁规划的站点中心度计算结果。中心度最高的五个地铁站点 (以红色显示) 为汉口火车站、香港路、徐家棚、王家墩以及武昌火车站。其中三个站点在汉口地区而两个站点在武昌地区。另外, 这五个站点中还包括两个火车站, 说明这两个火车站将得到很好的服务。不过相比较而言新建的高铁站

“武汉站”虽然也是4号线和10号线的换乘站，但其中心度却比较低。就非换乘站而言，贯穿汉口和武昌的2号线上的非换乘站的中心度仍然最具优势，其次则是同样横贯汉口和武昌的7号线以及横贯武昌和汉阳的10号线。中心度最弱的则为位处武昌的5号线与9号线上的非换乘站，这两条线路与其他线路的连接度都比较差。

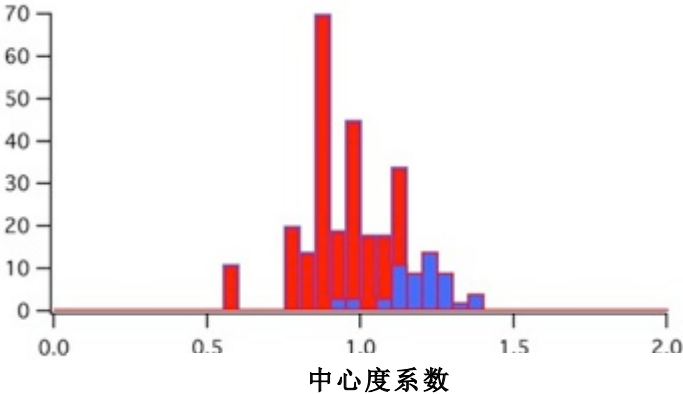


图 6.18 武汉 2020 年地铁站中心度系数直方图 ( ©王曦 )  
(蓝色表示换乘站，红色为非换乘站)

图 6.18 为武汉市 2020 年地铁规划的中心度系数直方图。从图上可以看到大部分的换乘站点的中心度较非换乘站来说都比较有优势，不过也有个别线路上的非换乘站比较有优势，其中心度高于某些换乘站点。该地铁网络计算所得的换乘效率值 Eff 为 0.946。相比较巴黎地铁网络现状计算所得的换乘效率值 0.860 以及考虑 RER 线路与地铁间换乘的效率值 0.771 而言，武汉地铁网络体现了明显的优势。这说明武汉地铁的换乘效率其实是比巴黎地铁网络要高的。



图 6.19 武汉市规划的 2020 年地铁网络 ( ©王曦 )

若我们再进一步观察武汉市地铁 2020 年规划的地铁网络（如图 6.19）所示，我们可以发现，或许由于地理环境的限制因素（水体等）造成武汉地铁线路设计的“非常规性”，或者说看上去“逻辑性”不强，与类似北京地铁这样规整的地铁网络相比较而言，武汉地铁有其特殊性。虽然武汉地铁 2020 年规划中并没有出现明显的环线型地铁线路，但实际上有不少由多条地铁线路所组成的组合型环状线路（如图 6.20 所示）。另外，值得一提的是，在此地铁网络中有多条线路的选线都比较曲折，例如地铁 7 号线、8 号线和 11 号线。这样设计的用心之处是为了让地铁线路可以尽可能穿过更多的区域。而地铁网络换乘效率分析结果说明这样的设计思路其实是成功的。因为相比巴黎地铁而言，乘客从武汉 2020 年的地铁网络中任意一点出发，可以通过更少的换乘次数到达任意一个目的站点。

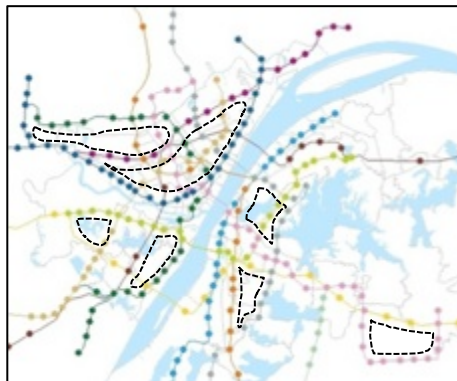


图 6.20 武汉 2020 年地铁网络规划中的某些环状线路

## 6.4 对武汉地铁网络的发展方案分析

从武汉市 2020 年规划的各线路间的换乘情况，我们可以看出地铁 2 号线及地铁 7 号线的连接度最好，与所有线路都有直接换乘。而 9 号线的连接度最差，只与其中三条线路有直接换乘，而与其它八条线路之间都需要两次换乘。其次则是 1 号线、5 号线和 12 号线，分别与四条线路需要两次换乘。而从地铁站分布的情况来看，在武昌、汉口和汉阳三个城区之间，汉口区的地铁覆盖率相对较高，并且换乘站非常的多，地铁线路之间的连接性强。

在之前的分析中，我们发现地铁线路的中心度与其连接度有很大的关系。地铁线路的连接度越高，一般该线路上的非换乘站的中心度也就越高。由此我们可以知道在武汉地铁 2020 规划的地铁网络之中，需要进行改善的主要是那些连接度较差的地铁线路，即地铁 9 号线以及 1 号线、5 号线和 12 号线等。在下面的章节中，我们将提出武汉市地铁网络规划的发展方案，并且将对其进行中心度分析和地铁网络换乘效率分析。

### 6.4.1 地铁发展方案分析（阶段一）

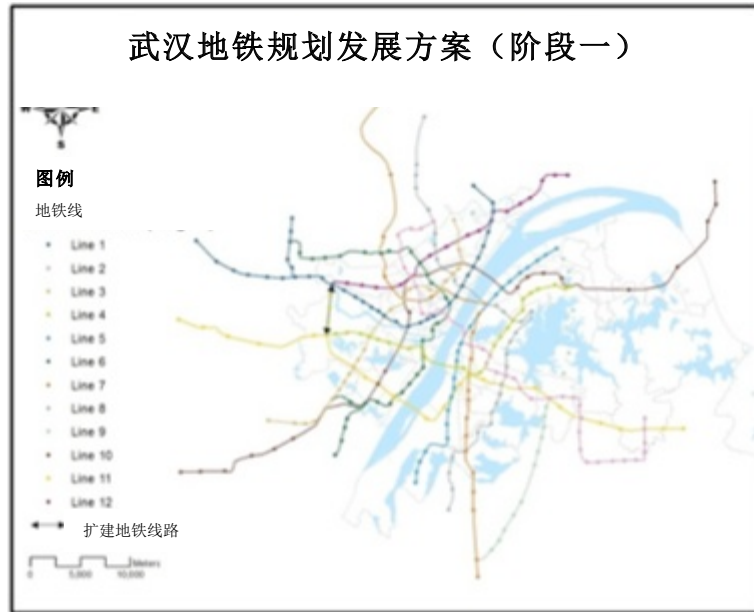


图 6.21 武汉地铁规划发展方案（阶段一）（©王曦）

如图 6.21 所示，为武汉地铁规划的发展方案（阶段一）。此发展方案主要是针对 4 号线路的改动。4 号线贯穿武昌和汉阳，连接着几个重要的火车站，包括武汉站、武昌火车站、汉阳火车站及今后可能修建的新汉阳火车站，因此在地铁网络中所扮演的角色比较重要。在之前的各线路间连接度分析中，我们观察到 4 号线与 1 号线和 12 号线都没有直接换乘，且后面这两条线都属于连接度不是特别高的线路（与四条线路需要两次换乘）。

因此对于该发展方案的设计在于连接 4 号线和 11 号线的换乘站点黄金口站，与 1 号和 12 号线路的换乘站舵落口站，这样一来可以同时提高三条线路的连接度，并且提高其相应的中心度。此改动将会增加三个非换乘站，但并不会增加换乘站点的个数。此方案同时还可以减轻 2 号线的交通压力，因为在 2020 年的地铁规划中主要是由地铁 2 号线承担着武昌和汉口的交通客流量运输的任务。



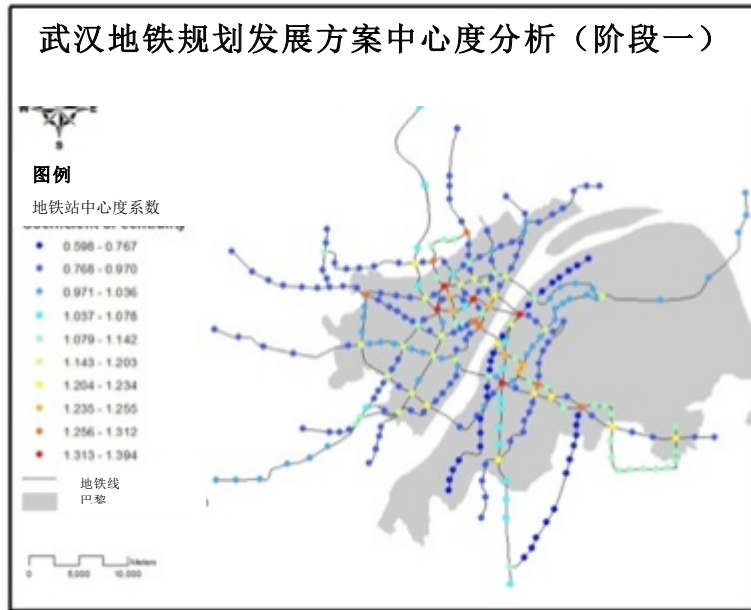


图 6.22 武汉地铁规划发展方案中心度分析 (阶段一) (©王曦)

在发展方案阶段一中，我们将 4 号线西端的终点站延伸至 1 号线和 12 号线的换乘站点黄金口站。整体来说增加了三个非换乘站，但换乘站点数不变。如图 6.22 为根据该发展方案所做的中心度分析图。相比之前的规划而言，这次改动并没有从整体结构上改变整个地铁网络，特别是一些换乘站点在地铁网络中的重要性，例如中心度最高的五个地铁站仍然是汉口火车站、香港路、徐家棚、王家墩以及武昌火车站。但此方案主要还是对相关的几条地铁线路上的非换乘站产生了影响。如提高最多的是地铁 4 号线的中心度系数由 0.878 提高到了 1.032，该线路上的上的换乘站点的中心度系数也较之前有所提高，其次则是地铁 1 号线及 12 号线上的非换乘站及换乘站点。其余线路上的普通站显示出略微的降低，例如 10 号线的中心度系数从 1.0361 降至 1.0357（仅分析中心度深度不够），但由于下降幅度非常小，因此可以忽略不计。该地铁网络的换乘效率值  $Eff$  为 0.969，比之前规划的换乘效率值 ( $Eff=0.946$ )有所提高。这说明此发展方案成功将从整体上提高武汉地铁网络的换乘效率。

## 6.4.2 地铁发展方案分析（阶段二）

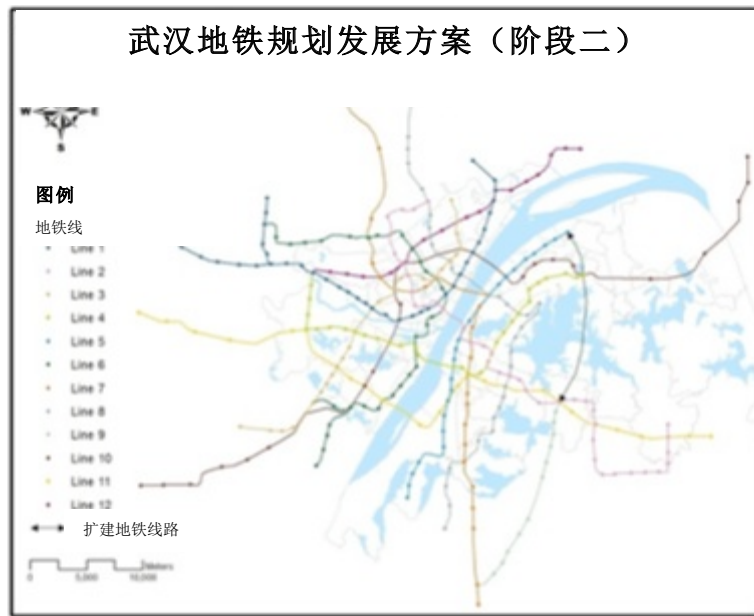


图 6.23 武汉地铁规划发展方案（阶段二）（©王曦）

根据之前的分析，在整个武汉地铁网络规划中连接度最弱且非换乘站点中心度最低的就是地铁 9 号线，因此接下来的几个阶段的发展方案主要都是针对 9 号线的。在阶段二中，我们将 9 号线由与 2 号线和 11 号线的换乘站光谷广场站延伸至 4 号线与 10 号线的换乘站武汉火车站，最后到 5 号线北部的终点站。如图 6.24 所示，为武汉地铁规划的发展方案。该发展方案的整个延伸线都在武昌地区，新增了五个非换乘站以及一个换乘站点，并且新增了 9 号线与 4 号线、5 号线及 10 号线的连接，这样一来 4 号线和 10 号线将成为继 2 号线之后与其它所有线路都相交的地铁线路。值得一提的还有，此次改动也将加强武汉火车站的中心度，以便提供更好的服务。

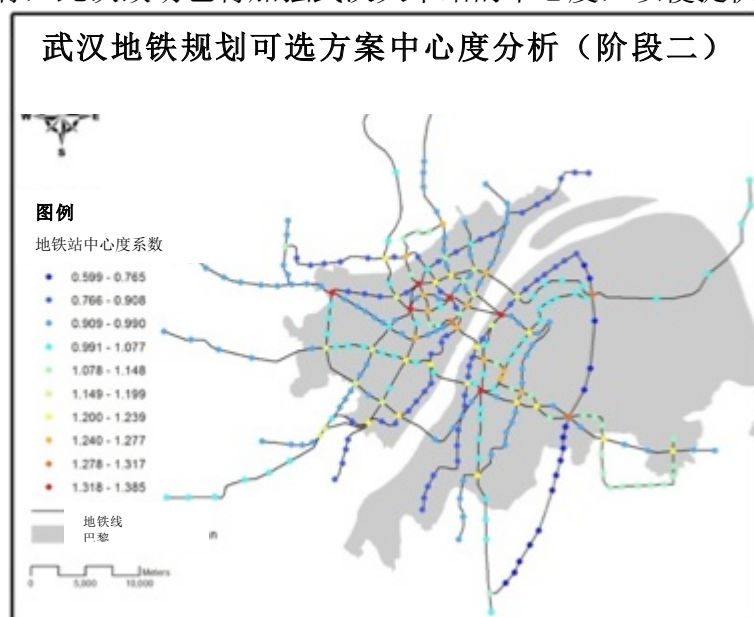


图 6.24 武汉地铁规划发展方案中心度分析（阶段二）（©王曦）

图 6.24 显示了发展方案阶段二的中心度分析结果。我们可以看到相比阶段一而言，高铁站武汉站在所在与 9 号线连接之后，其中心度得到了大大的提高。但一些重要的换乘站与阶段一相比，其中心度却没有非常大的改善。不过，某一些地铁线路上的非换乘站点的中心度却有所提高。例如，地铁 1 号线、3 号线、4 号线、8 号线、10 号线和 11 号线相比之前要变得更加重要。虽然 9 号线上的非换乘站点的中心度也有所提高，但它在整个网络中仍然是中心度非常薄弱的。地铁网络的换乘效率值为 0.973，相比阶段一来说（换乘效率值 Eff 为 0.969）有所提高。

### 6.4.3 地铁发展方案分析（阶段三）

在武汉地铁发展方案的阶段三中，我们将继续针对 9 号线进行改进。如图 6.25 所示为地铁网络发展方案的示意图。此次改动主要还是延伸 9 号线并使其穿过长江，最后 1 号线和 12 号线的滕子冈站相连接。此次改动并没有增加任何的非换乘站或是换乘站点，但将增加 9 号线与 1 号线及 12 号线之间的连接。

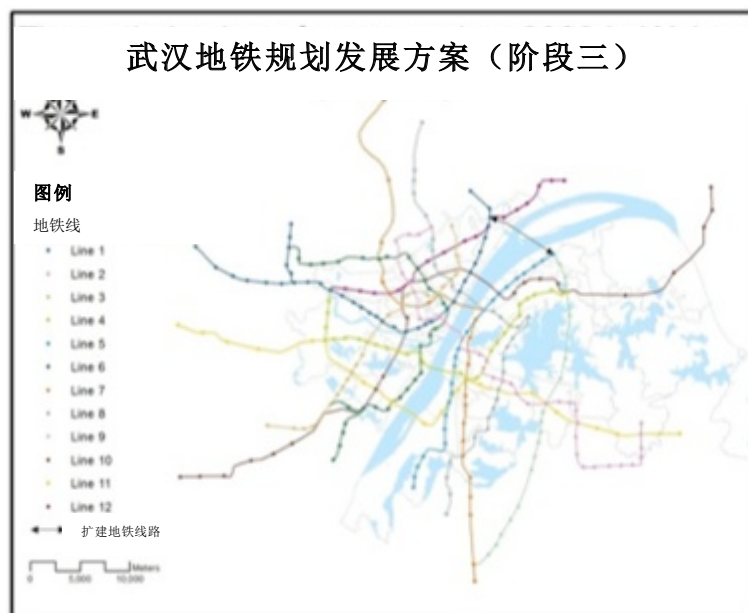


图 6.25 武汉地铁规划发展方案（阶段三）（©王曦）

图 6.26 显示了武汉地铁规划发展方案阶段三的中心度分析结果。根据中心度分级显示的不同颜色上看来，是多条线路上的非换乘站点的中心度有所降低。实际上，如果我们进一步观察中心度指数值，多条线路上的非换乘站点的中心度实际上是不变的，除了 1 号线、9 号线和 12 号线上非换乘点的中心度有所提高。即使这些线路上的非换乘站点中心度有所提高，但它们仍然被归作是中心度最低的线路。对于换乘站来说，它们的中心度没有发生很大的变化。在阶段三中，地铁网络的换乘效率 Eff 为 0.993，相比之前的换乘效率（Eff 为 0.973）来说有所提高。

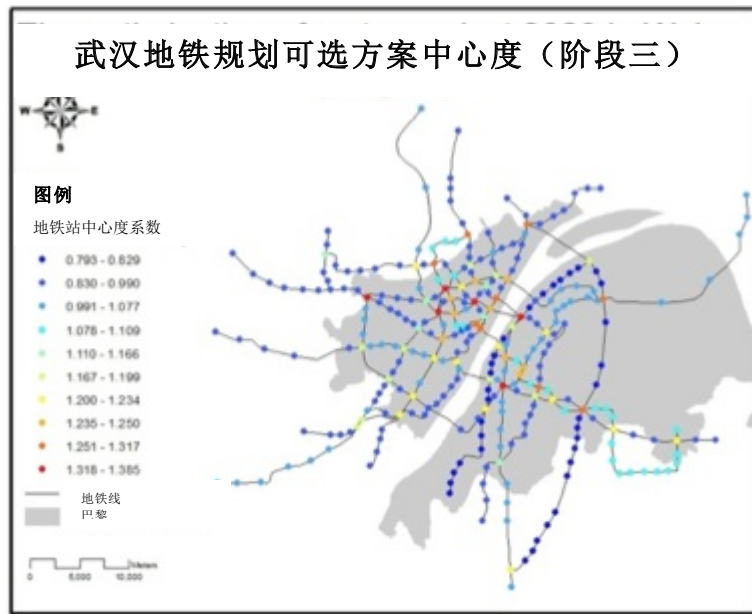


图 6.26 武汉地铁规划发展方案中心度分析 (阶段三) (©王曦)

#### 6.4.4 地铁发展方案分析 (阶段四)

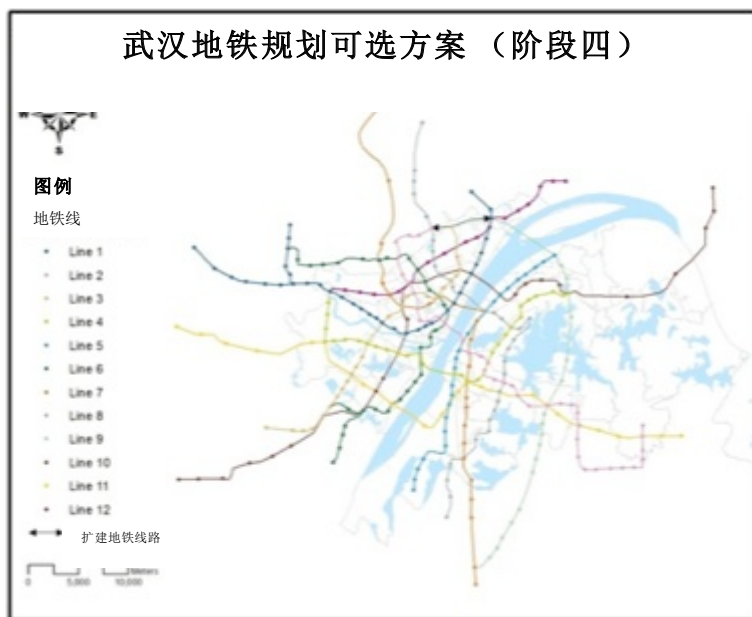


图 6.27 武汉地铁规划发展方案 (阶段四) (©王曦)

如图 6.27 所示为武汉地铁规划发展方案 (阶段四) 的示意图。在之前的几个阶段中, 9 号线的连接度以及中心度都有所提高。然而, 它仍然是地铁网络中最弱的地铁线路。因此, 在本阶段中, 我们对贴网络的改动将仍然是针对 9 号线进行。我们将 9 号线延伸, 从 1 号线 12 号线的换乘站藤子冈站起延伸至 3 号线的终点站市民之家, 再进而延伸至 2 号线与 8 号线的换乘站点宏图大道站。此次改动将增加一个

非换乘站以及一个换乘站点。这次改动将增加 9 号线与 3 号线以及 8 号线的换乘。此次改动之后，9 号线将作为环线型与 2 号线合闭成一个半圆的环线。

表格 6.5 武汉地铁发展方案对地铁线路连接度的改变

		1 号线	2 号线	3 号线	4 号线	5 号线	6 号线	7 号线	8 号线	9 号线	10 号线	11 号线	12 号线
需 二 次 换 乘 线 路	原 规 划	4	0	2	3	4	3	0	2	8	1	2	4
	发 展 方 案	2	0	1	0	3	3	0	1	2	0	2	2

如表格 6.5 所示，为发展方案进行到阶段四之后，相比 2020 年的武汉市地铁规划。我们可以看到，改动进行到这一阶段已经大大改善了某些地铁线路的连接度，十二条线路中只有 6 号线和 11 号线的连接度没有增加。在此阶段的发展方案中没有直接换乘的线路多是两条线路在长江两岸或是完全平行的，如地铁 5 号线与 1 号线、3 号线及 12 号线就是这种情况。

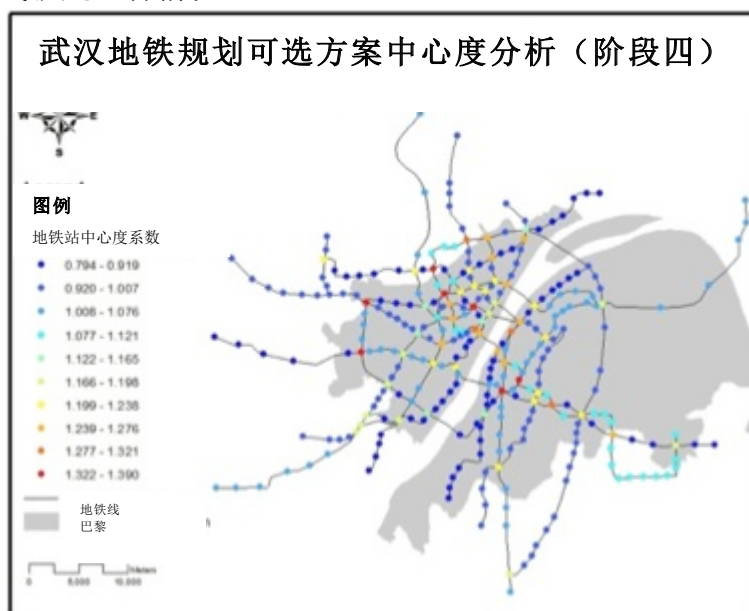


图 6.28 武汉地铁规划发展方案中心度分析（阶段四）（©王曦）

如图 6.28 所示为武汉地铁规划发展方案阶段四的中心度分析结果。9 号线上的非换乘站点首次没有被归类到中心度最低的级别之中。8 号线上非换乘站点的中心

度也有所提高。而其他线路上的非换乘站点则没有太大变化。在这个阶段中的线路改动更多的影响了换乘站点，而不是非换乘站点的中心度。中心度最高的那些换乘站点不再只集中在城市中心，但同时也出现在城市外围区域。在几个阶段的改动过后，9号线成为了一条半环线型地铁线路。这个改动很明显的影响到了地铁网络中某些站点的重要性。最终地铁网络的换乘效率值  $Eff$  提高到了 1.007。

## 6.5 本章小结

本章的主要内容是以武汉市的地铁网络现状及规划为例，采用中心度分析方法来进行的一个实例研究。在本章的开始，我们对武汉市的基本情况进行了回顾，包括武汉市的行政区划，城市化的进程以及道路交通网络等进行了阐述。

在接下来的章节中，我们对武汉市 2014 年的地铁网络现状以及 2017 年和 2020 年地铁网络规划进行了介绍，并且对不同阶段的地铁网络形态的基本特征进行了定性分析。我们可以看到武汉市地铁网络在这六年中将逐步发展的过程。到 2020 年，武汉市将拥有十二条地铁线路，其中一半的地铁线路都将跨过长江以便利过江交通。同时，由于武汉市地理环境的限制（如水域分布等），最终使得武汉地铁线路的设计有其独特性。虽然直至 2020 年，武汉地铁网络中仍然没有环线型线路，但由多条线路曲折相交而形成了不少组合环线。

之后，我们对武汉市地铁网络现状及规划进行了中心度分析，以定量分析的方式来研究了武汉地铁网络的结构中心度及换乘效率。2014 年的地铁网络结构还比较简单，仅有三条地铁线路和三个换乘站点，而中心度最高的为横跨汉口和武昌两个地区的地铁 2 号线。在 2017 年，武汉的地铁网络已具备了比较完整的架构，一共有七条地铁线路，同时换乘站增加到了二十三个。2 号线仍然为中心度最高的线路之一。除此之外，3 号线上的换乘站和非换乘站的中心度也比较高。2017 年的地铁规划网络的换乘效率相比 2014 年的地铁网络现状有所提高。从地铁站分布的情况上来看，汉口地区的地铁分布比较密集，而其它区域，特别是武昌区的地铁站覆盖率相对而言还比较低。

到 2020 年，武汉地铁网络的发展已经比较完善，地铁站覆盖了武汉三镇的大部分区域，只有武昌部分的洪山区和青山区还有少数区域没有地铁站分布。地铁 2 号线仍然是地铁网络中非换乘站点中心度最高的线路，其次是 7 号线和 10 号线。而中心度较高的换乘站点主要分布在汉口区域。中心度最高的几个站点均为换乘站点：包括汉口火车站、香港路站、徐家棚站、王家墩站以及高铁武汉站。而中心度最低的站点主要是分布在 5 号线和 9 号线上的非换乘站点。

2020 年地铁网络规划与 2017 年相比，整体地铁网络的效率值有所下降。在对多个地铁网络的分析之后，我们发现决定地铁网络换乘效率的主要有三个变量，包



括地铁线路条数、地铁站总数以及换乘站点数。通过分析，我们发现地铁网络换乘效率与换乘站总数成正比，但与地铁线条数以及地铁站总数成反比。在 2020 年的地铁网络规划中，虽然换乘站点数由 2017 年的 23 个增加到了 59 个，但是地铁总数几乎翻倍（从 149 个增加到了 287 个），同时地铁线路也由 7 条增加到了 12 条。这就是为什么地铁网络的平均换乘效率有所下降。

在本章的最后一节，我们针对武汉 2020 年的地铁规划提出了相应的发展方案分析。根据前几章的分析结果可知，地铁线路的连接度和中心度有很强的相关性，因此我们对连接性较差的地铁线路提出了一些发展方案，其中主要涉及 4 号线和 9 号线的扩建。

发展方案主要分为四个阶段，第一阶段的扩建内容在于延伸 4 号线，连接 4 号线和 11 号线的换乘站点黄金口站，与 1 号和 12 号线路的换乘站舵落口站。而接下来的几个阶段都为对 9 号线的扩建延伸：首先我们将 9 号线由与 2 号线和 11 号线的换乘站光谷广场站延伸至 4 号线与 10 号线的换乘站武汉火车站，然后到 5 号线北部的终点站（阶段二）；接下来延伸 9 号线使其穿过长江并与 1 号线和 12 号线的藤子冈站相连接（阶段三）；最后将 9 号线从藤子冈站起延伸至 3 号线的终点站市民之家，再进而延伸至 2 号线与 8 号线的换乘站点宏图大道站。

经过这四个阶段的线路扩建之后，与武汉 2020 年的地铁网络规划相比而言，多条地铁线路的连接度都有所提高，特别是 9 号线的连接度。而地铁网络的换乘效率值  $Eff$  从 2020 年规划的 0.946 增加到了 1.007，说明这个发展方案确实能够提高该地铁网络的换乘效率。

通过本章中以武汉市地铁现状及规划的相关分析，我们实践了对地铁网络进行分析评价的一种方法手段，同时我们还可以根据分析结果来对地铁网络提出可能的发展方案，并且通过对发展方案的分析来进一步研究地铁网络结构的变化以及换乘效率是否有所提高等等。结果证明，中心度分析方法可以被应用于对地铁网络现状及各种规划方案间的比较研究。

## 7 结论与展望

### 7.1 反思研究目的及具体研究问题

根据本文的研究目的和具体的研究内容，我们将总结本文的研究内容如下：

首先我们对已有国内外的研究进展进行了回顾，对复杂网络的基本理论，中心度的概念以及中心度分析方法进行了系统的阐述，分别介绍了度中心度（Degree）、紧密中心度（Closeness）、介数中心度（Betweenness）等经典的中心度分析指数。然后进一步介绍了一个新的中心度指数——结构中心度（Structurality）的概念以及具体的分析计算方法。

在第三章中，我们研究巴黎地铁的历史演变过程，我们将巴黎的地铁发展分为1900年之前的地铁规划、地铁建设之初（1900 - 1903年）、地铁网络初步形成（1904年 - 1910年）、地铁网络的完善（1910 - 1914年）、第一次世界大战对巴黎地铁建设的影响（1914 - 1929年）、地铁线路向巴黎郊区延伸（1930 - 1939年）、第二次世界大战对巴黎地铁建设的影响（1939 - 1949年）以及 RER 远程快轨的修建（1949 - 2000年）等八个阶段进行了逐步的分析，并且对地铁网络发展过程中一些线路的改动做出了详细探讨，并分析了线路改变的历史背景及相关原因。

在接下来的一章中，我们特别选取了巴黎发展进程中比较重要的几次线路改动作为案例来进行案例分析。这些案例包括：1910年4号线上南北部分的连接；1931年7号线的延伸以及它与10号线部分线路的并轨；1937年8号线、10号线和14号线之间的线路转换以及1942年5号线的部分线路并入6号线中这四个线路间的改动。我们将这些案例分为改动前（阶段 A）和改动后（阶段 B）两个阶段来分别进行分析研究，并比较改动前与改动之后地铁站中心度的变化以及地铁网络换乘效率的变化等。

在本文的第五章，我们具体对巴黎地铁网络的现状进行了相关的分析研究。首先我们分布了巴黎地铁站的分布情况、地铁线路的形态特征以及地铁网络与道路网络之间的关系。之后我们具体分析了巴黎地铁站点的中心度，以及考虑地铁与 RER 远程快轨换乘之后的地铁站中心度。接下来，我们比较了地铁站点的中心度与其入站交通量密度之间的关系，并且特别比较了换乘站点以及周边非换乘站点的中心度和入站交通量的关系。另外，我们还选取了巴黎地铁线路中几个不同线路类型的代表，并逐一分析了这些线路上的中心度以及交通量密度分布。在第五章的最后，我们以巴黎地铁的相关参数（站点总数、线路条数）为标准，做出了五个简化模型以及两个巴黎地铁模型，并且分析和比较了不同模型的站点中心度以及地铁网络换乘效率。

在本文的最后一章中，我们以武汉市的地铁网络现状及规划为案例进行了一系列的分析。首先，我们概述了武汉市的基本情况、近年来的城市化进程以及城市道路网络状况等。接下来，对武汉市地铁网络现状及 2017 年和 2020 年规划的地铁网络的基本情况与特征进行了分析。并且对这三个阶段的地铁网络分别进行了中心度分析，研究了武汉地铁网络在不断修建完善的过程当中，地铁站中心度的变化以及地铁网络换乘效率值的改变等。最后，我们针对武汉市 2020 年地铁规划提出了相应的地铁发展方案，并且将该发展方案分为四个不同阶段，对每个阶段地铁网络的中心度和换乘效率进行了分析比较。

## 7.2 本研究主要结论小结

本小节中，我们将本研究的主要结论总结如下：

在本文第三章对巴黎地铁网络历史演变的案例研究中，我们发现在某一些地铁线路改动之后，地铁网络的换乘效率得到了提高。例如，在案例二中，多条地铁线路上的站点的中心度得到了提高。而整体地铁网络的换乘效率值优于改动之前。另外，在案例三中，虽然 5 号线、8 号线以及 9 号线之间的线路改动是四个案例中最为复杂的一个，但此次改动对地铁网络换乘效率的影响却并不明显，换乘效率值仅从 0.850 提高到了 0.856。

在案例一和案例四中，分析结果显示地铁线路的改动对于整体地铁网络的影响更多是负面的。在案例一中，尽管换乘站点的中心度得到了加强，但是整体地铁网络的换乘效率值却下降了。分析结果显示非换乘站数目的增加有可能会使地铁网络的换乘效率值有所降低。在案例四中，虽然地铁网络之间的改动使 6 号线的中心度增加了，但是另外有其它多条地铁线路的中心度都有所下降。而地铁网络的换乘效率值  $Eff$  也有 0.860 降至 0.841。我们对多个地铁网络的分析总结之后发现，会影响地铁网络换乘效率值的因素主要有三个：地铁线条数、地铁站总数和换乘站点数。而换乘站点数与地铁网络换乘效率值成正相关，地铁线条数和地铁站总数分别于换乘效率成负相关。

在之后对巴黎地铁网络现状的中心度分析中，我们发现普遍来说换乘站点的中心度比非换乘站的中心度要高。五个中心度最高的站点包括：République 站、Châtelet 站、Opéra 站、Nation 站和 Montparnasse-Bienvenue 站。我们同样也分析了考虑地铁与 RER 之间的换乘影响下的地铁中心度分布情况。结果显示，在 RER 换乘的影响之下，某些换乘站点的中心度有所提高。然而考虑 RER 站点的地铁网络的换乘效率值比单纯的地铁网络的换乘效率值要低出许多。这是由于在 RER 线路上，巴黎市区以外的部分有很多非换乘站。而这些单一的非换乘站点使得地铁网络的换乘效率值有所下降。

在比较了中心度指数与进站交通量之后，我们发现了比较有意思的结果。大多数进站交通量较高的地铁站同时也是换乘站。我们发现换乘站点的进站交通量比非换乘站的进站交通量普遍要高。五个交通量最大的站点为 Saint-Lazare 站、 Gare du Nord 站、 Montparnasse-Bienvenue 站、 Châtelet 站和 République 站。我们发现地铁站的中心度系数与进站交通量密度之间有很好的关联性。同时，中心度指标能够很好的指示出地铁网络中几个比较重要的站点。

另外，我们还观察到换乘站点周围呈现出一种“水泵效应”，即换乘站周围的非换乘站的中心度系数以及交通量密度都呈现降低的趋势。而巴黎几大火车站旁边的非换乘站的进站交通量密度比它们的中心度指数所呈现出来的重要程度要高。这说明我们在之后的研究中还需要考虑到从外省坐火车来巴黎的客流量对巴黎地铁进站交通量的影响。相反的，某些与 RER 远程快轨有换乘的地铁站点的影响性却被高估了，也就是说这些站点的中心度较高，但却没有与之匹配的进站交通量密度。例如，Invalides 站（地铁 8 号线、13 号线和 RER C 线换乘站）的中心度指数比较高，但是其交通量密度却比较低。也就是说 RER C 对于该站点的影响并没有其中心度指数所体现的那么重要。另外一个例子是 Porte Dauphine 站，它在分析中被当做与 RER C 线上的 Avenue Foch 站的换乘站。然而实际上两个站点之间还需要步行相当的距离才可以进行换乘，因此对于乘客来说并不可达。

在之前对于巴黎地铁网络的分析中，我们发现地铁线的中心度（及地铁线上非换乘站点的中心度）与地铁线之间连接度有非常强的关联性。基于这个分析结果，我们以巴黎地铁网络的参数设置为标准（14 条地铁线及 303 个地铁站）建立了五个简单地铁模型，并根据巴黎地铁线路的连接度指标为参照建立了两个巴黎地铁模型来进行进一步的分析。在针对简单模型的中心度分析中，我们发现一般来说换乘站点数的增加能够提高地铁网络的换乘效率值。而在一条地铁线路上，若换乘站点数相同，那么非换乘站数目越多则该线路上的非换乘站的中心度就越高。

对于巴黎地铁模型来说，结果显示模型一的中心度比模型二的地铁站点的中心度分布要更为均匀。模型二可以作为一个有着大型商业中心的城市中的地铁网络。在具体的地铁网络规划设计中，可以通过地铁站中心度和地铁网络换乘效率这两个参数来从不从角度比较地铁网络设计方案。例如，有的设计方案可以很好的提高个别站点的中心度，但地铁网络的换乘效率却不是最优；有的设计方案中地铁网络换乘效率相对较高，但其地铁站点的中心度却表现一般。最终采取哪种设计方案，还是要取决于规划师和决策者对于地铁规划的功能定位及发展远见。

在最后一章对武汉地铁网络现状以及规划的案例分析中，分析结果显示武汉地铁网络的换乘效率值从 2014 年现状到 2017 年规划有所提高，而 2020 年规划的地铁网络的换乘效率相比 2017 年却有略微的降低。分析结果表明，地铁网络换乘效率与地铁站总数、地铁线路数以及换乘站数目等都有关联性，并且它与地铁总数和

地铁线路数呈负相关，而与换乘站点数呈正相关。在武汉地铁的案例中，2020 年的地铁规划与 2017 年规划相比新增了四条地铁线路，但换乘站点数目却没有相应程度的增加，因此整体地铁网络的换乘效率有所下降，因此在做地铁网络规划设计时应该综合考虑这三个指标。例如，若对已有地铁网络进行扩建时，若需要新建数条线路，但换乘站点的数目却没有显著增加的话，那么对整体网络的换乘效率来说，影响将是负面的。

但值得一提的是，武汉市地铁网络的换乘效率要高于巴黎地铁网络换乘效率。虽然由于地理环境的限制因素（水体等）造成武汉地铁线路选线比较曲折，但许多地铁线路尽可能地穿过了更多的区域，反而增加了地铁线路之间的连接性，从而增加了地铁网络的换乘效率。最终在武汉地铁 2020 年的规划中，中心度最高的为换乘站点：汉口火车站、香港路站、徐家棚站、王家墩站以及高铁武汉站。非换乘站中心度最低的为 9 号线。而 1 号线、5 号线以及 12 号线的连接度都比较薄弱。

随后我们针对武汉 2020 年的地铁规划提出了发展方案分析。其中主要涉及 4 号线和 9 号线的改动，比较武汉 2020 年的地铁网络规划而言，多条地铁线路的连接度有所提高，特别是 9 号线的连接度。地铁网络的换乘效率值  $Eff$  从 2020 年规划的 0.946 增加到了 1.007。以武汉地铁为例的案例分析报告说明中心度分析能够帮助规划师们分析出地铁网络中相对重要的地铁站点。这可以让规划师以及设计师估计地铁站点的进站交通量。并且最终这些指数能够被用来分析和比较不同的地铁规划方案来做技术支持。

### 7.3 本课题研究展望

在论文的最后，我们将根据对本研究的反思和结论，来进行今后研究方向的展望。

首先，在本研究中，我们比较了巴黎地铁站点的中心度以及其交通量密度之间的关系。在计算交通量密度的过程中，我们并没有考虑人口密度分布的问题。然而，在本研究中即使单纯利用 Voronoi 的面积来模拟所服务的人口而将中心度及交通密度进行比较，我们仍然看到了两者间的相关性，这正说明了结构中心度这个指数所包含的信息量是很有价值的。但在今后的研究中，我们可以将更多的相关变量考虑进来，并进行建模人口密度分布以及用地等多因素再对地铁站点的中心度和进站交通量密度进行比较。

我们在论文第三章对巴黎地铁的研究中，分别对巴黎地铁网络以及考虑与 RER 换乘之后的地铁网络分别进行了分析。主要是由于巴黎公交系统采用的 Navigo 卡可以方便乘客们在不同模式的轨道交通中进行自由的换乘，那么在地铁与 RER 的换乘站，自然会有通过 RER 远程快轨从大巴黎区进入的客流量对进站交通量的影响。但

同样的情况下，从巴黎的五大火车站，包括 Gare du Nord 站、Gare de Lyon 站、Gare de l'est 站、Gare d'Austerlitz 站和 Gare Montparnasse 站进入的这些来自法国其它地区的乘客也将会对巴黎地铁站的入站交通量产生一定的影响，在本论文中我们为了简化分析，而并没有考虑到火车客流量对这些站点的影响。那么在今后的分析研究当中，我们可以进一步考虑到这些火车客流量的影响，增加这些站点的权重，再进一步进行分析。

在第五章中，我们简单的比较了一下巴黎地铁网络和道路网络之间的关系，发现有不少线路都与道路网络有所叠加。在今后的研究中，我们可以进一步分析巴黎道路网络的中心度，比较一下中心度较高的道路与地铁站的空间相关性。并且分析研究地铁网络与道路网络之间的关系，是属于一种互补关系，还是说地铁线路选线的逻辑类似于第二个道路系统？这样可以有助于我们分析城市肌理对地铁网络形态的影响。

在本研究中，我们针对许多不同的地铁网络进行了中心度分析，并计算了他们的换乘效率值 Eff。这些地铁网络包括：巴黎地铁网络发展的四个案例中阶段 A 和阶段 B 的地铁网络，巴黎地铁现状网络、巴黎地铁及考虑与 RER 换乘的现状网络，武汉市 2014 年地铁现状网络以及 2017 年和 2020 年的地铁规划网络，另外还有五个简单地铁模型以及两个巴黎地铁模型。我们发现到不同的地铁网络中，影响地铁网络换乘效率 Eff 值的有三个变量：地铁线条数、地铁站总数以及换乘站点数。同时我们观察到地铁网络换乘效率与换乘站点数成正比，而与地铁线条数和地铁站总数乘反比。因此，我们可以总结出一些经验，例如对地铁网络进行扩建的时候，如果需要增加新的地铁线路，而却没有明显增加换乘站点的时候，地铁网络的换乘效率很有可能会下降。然而，在本研究中我们并没有找到它们之间具体的函数关系。在今后的研究中，我们可以通过选取更多的实例来对这三个变量之间的关系进行建模研究。

在论文最后，我们针对武汉市 2020 年地铁规划分四个阶段提出了发展方案，但我们并没有提供多个发展方案以便进行武汉市地铁发展的可选项分析（Analysis of Alternatives）。在接下来的研究中，我们可以进一步针对武汉市 2020 年规划提出不同的可选方案，然后对不同的方案进行比较。例如在地铁网络中加入环状地铁线路等，或许将会更大程度上的改变地铁网络的结构等。通过这些可选方案的比较，将会为武汉地铁网络的发展提供更加全面、有效的规划支持。



## 参考文献

- 曹小曙和林强 (2008). “世界城市地铁发展历程与规律.” 地理学报(12): 1257-1267.
- 程昌秀, 张文尝, 陈洁和蔡俊 (2007). “基于空间句法的地铁可达性评价分析——以 2008 年北京地铁规划图为例.” 地球信息科学(06): 31-35.
- 丁益民, 丁卓和杨昌平 (2013). “基于社团结构的城市地铁网络模型研究.” 物理学报(09): 508-514.
- 李军, 谢宗孝等 (2002). “武汉市产业结构与城市用地及空间形态的变化.” 武汉大学学报: 工学版 35 (5): 29-32.
- 高自友, 张好智和孙会君 (2004). “城市交通网络设计问题中双层规划模型、方法及应用.” 交通运输系统工程与信息 4 (1): 35-44.
- 曾刚和王琛 (2004). “巴黎地区的发展与规划.” 国外城市规划(5): 44-49.
- 梁宁慧, 刘新荣, 曹学山, 钟正君和廖靖 (2008). “中国城市地铁建设的现状和发展战略.” 重庆建筑大学学报 30 (6): 81-85.
- 胡华颖和李观华 (1991). “广州地铁路网规划与客流预测研究.” 中山大学学报: 自然科学版 30 (3): 91-95.
- 欧阳敏, 费奇, 余明辉 (2008). “复杂网络的功效性与脆弱性研究综述.” 计算机科学 35 (6): 1-4.
- 杨震 (2014). “地铁站点布局优化方法.” 城市轨道交通研究 17 (2): 86-90.
- 章忠志 (2006). 复杂网络的演化模型研究 博士, 大连理工大学.
- 周群, 马林兵, 陈凯和曹小曙 (2015). “一种改进的基于空间句法的地铁可达性演变研究——以广佛地铁为例.” 经济地理(03): 100-107.
- 张建华 (2012). 地铁复杂网络的连通脆弱性研究 博士, 华中科技大学.
- 张晋, 梁青槐和贺晓彤 (2013). “北京市地铁网络拓扑结构复杂性研究.” 北京交通大学学报(06): 78-84.
- 张铁岩, 宋瑞, 郑锂和徐瑜婷 (2012). “基于复杂网络理论的国内地铁网络特性分析.” 交通信息与安全(05): 50-54.
- 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- 王远飞 (2006). “GIS 与 Voronoi 多边形在医疗服务设施地理可达性分析中的应用.” 测绘与空间地理信息 29 (3): 77-80.

- Angeloudis, P. and D. Fisk (2006). "Large subway systems as complex networks." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **367**(0): 553-558.
- Albert, R., Jeong, H., Barabási, A-L (2000). Error and attack tolerance of complex networks. Nature. **406** (6794): 378-382.
- Bagheri, N., A. Holt and G. Benwell (2009). "Using Geographically Weighted Regression to Validate Approaches for Modelling Accessibility to Primary Health Care." Applied Spatial Analysis and Policy **2**(3): 177-194.
- Bavelas, A. (1950). "Communication patterns in task-oriented groups." J. Acoust. Soc. Am. **22**(6): 725-730.
- Barberillo, J. and J. Saldaña (2011). "Navigation in large subway networks: An informational approach." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **390**(2): 374-386.
- Bonnin, P. and S. Douady (2013). "Morphogenèse du réseau viaire." Les réseaux dans le temps et dans l'espace.
- Bordin, P. (2006). Méthode d'observation multi-niveaux pour le suivi de phénomènes géographiques avec un SIG, l'Université de Marne-La-Vallée.
- Brabyn, L. and P. Gower (2004). "Comparing Three GIS Techniques for Modelling Geographical Access to General Practitioners." Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization **39**(2): 41-49.
- Bureau, B. and M. Glachant (2011). "Distributional effects of public transport policies in the Paris Region." Transport Policy **18**(5): 745-754.
- Caschili, S. and A. De Montis (2013). "Accessibility and Complex Network Analysis of the U.S. commuting system." Cities **30**(0): 4-17.
- Castillo-Manzano, J. I. and L. López-Valpuesta (2009). "Urban retail fabric and the metro: A complex relationship. Lessons from middle-sized Spanish cities." Cities **26**(3): 141-147.
- Christaller, W. (1975). La théorie des lieux centraux, CRU.
- Courtat, T. (2012). Walk on City Maps - Mathematical and Physical phenomenology of the City, a Geometrical approach.. Doctor, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Courtat, T., S. Douady and C. Gloaguen (2011). Centrality maps and the analysis of city street networks. Proceedings of the 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. Paris, France, ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering): 316-321.
- Cromley, E. K. and S. L. McLafferty (2002). GIS and public health. New York, Guilford Publications.

- Chang, K. H., K. Kim, H. Oshima and S. M. Yoon (2006). "Subway networks in cities." Journal of the Korean Physical Society **vol. 48**: pp. 143-145.
- Chen, S., C. Claramunt and C. Ray (2014). "A spatio-temporal modelling approach for the study of the connectivity and accessibility of the Guangzhou metropolitan network." Journal of Transport Geography **36**(0): 12-23.
- Cheng, Y.-H. and S.-Y. Chen (2015). "Perceived accessibility, mobility, and connectivity of public transportation systems." Transportation Research Part A: Policy and Practice **77**(0): 386-403.
- Dangalchev, C. (2006). "Residual Closeness in Networks." Physica A **365**.
- Derrible, S. (2012). "Network Centrality of Metro Systems." PLoS ONE **7**(7): e40575.
- Derrible, S. and C. Kennedy (2009). "Network Analysis of World Subway Systems Using Updated Graph Theory." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **No.2112**.
- Derrible, S. and C. Kennedy (2009). "Characterizing metro networks: state, form, and structure."
- Derrible, S. and C. Kennedy (2010). "Evaluating, Comparing, and Improving Metro Networks." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **No.2146**.
- Derrible, S. J.-M. (2010). The properties and effects of metro network designs.
- Derrible, S. and C. Kennedy (2011). "Applications of Graph Theory and Network Science to Transit Network Design." Transport Reviews **31**(4): 495-519.
- Derrible, S. (2012). "Network Centrality of Metro Systems." PLoS ONE **7**(7): e40575.
- Douady, C.-n. and E. Morphocity; (2014). De la trace à la trame: La voie, lecture du développement urbain, L'Harmattan.
- Dutt AK, Dutta HM, Jaiswal J and M. C (1986). "Assessment of service adequacy of primary health care physician in a two county region of Ohio, U.S.A. ." GeoJournal **12**: 443-455.
- Dupuy, G. (2013). "Network geometry and the urban railway system: the potential benefits to geographers of harnessing inputs from "naive" outsiders." Journal of Transport Geography **33**(0): 85-94.
- Gattuso, D. and E. Miriello (2005). "Compared Analysis of Metro Networks Supported by Graph Theory." Networks and Spatial Economics **5**(4): 395-414.
- Freeman, L. (1977). "A set of measures of centrality based upon betweenness." Sociometry **40**: 35-41.
- Han, S. S. and X. Wu (2004). "Wuhan." Cities **21**(4): 349-362.

- Hansen WG (1959). "How accessibility shapes land use." J Am Inst Plann **25**: 73-76.
- Higgs, G. and M. Gould (2001). "Is there a role for GIS in the 'new NHS'?" Health & Place **7**(3): 247-259.
- Henson Ralph, E. S. (2003). "Conception, organisation et évaluation de réseaux de transport locaux durables. " Revue internationale des sciences sociales **176**: 243-260.
- Hill, R. (1995). "The Toulouse Metro and the South Yorkshire Supertram: a cross cultural comparison of light rapid transit developments in France and England." Transport Policy **2**(3): 203-216.
- Hui, H. (2014). Un paysage culturel dynamique: Géographie historique et économique des musées parisiens. PhD, UNIVERSITÉ PARIS 1 PANTHÉON-SORBONNE.
- Knowles, R. D. (1996). "Transport impacts of greater Manchester's metrolink light rail system." Journal of Transport Geography **4**(1): 1-14.
- Joseph, A. E. and P. R. Bantock (1982). "Measuring potential physical accessibility to general practitioners in rural areas: A method and case study." Social Science & Medicine **16**(1): 85-90.
- Laurent Beauguitte (coord.) (2013). Les réseaux dans le temps et dans l'espace. Actes de la deuxième journée d'études du groupe fmr (flux, matrices, réseaux). Paris.
- Lagesse, C. (2015). Lire les lignes de la ville : méthodologie de caractérisation des graphes spatiaux. Doctor, Université Paris-Diderot - Paris VII.
- Laporte, G., J. A. Mesa and F. A. Ortega (2000). "Optimization methods for the planning of rapid transit systems." European Journal of Operational Research **122**(1): 1-10.
- Laporte, G., J. A. Mesa, F. A. Ortega and F. Perea (2011). "Planning rapid transit networks." Socio-Economic Planning Sciences **45**(3): 95-104.
- MERLIN, P. and F. CHOAY (1988). Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. Paris, PUF: p.118-119.
- Lee, S.-H., J.-Y. Choi, S.-H. Yoo and Y.-G. Oh (2013). "Evaluating spatial centrality for integrated tourism management in rural areas using GIS and network analysis." Tourism Management **34**(0): 14-24.
- Lovett, A., R. Haynes, G. Sunenberg and S. Gale (2002). "Car travel time and accessibility by bus to general practitioner services: a study using patient registers and GIS." Social Science & Medicine **55**(1): 97-111.
- Liu, Y. and Y. Tan (2013). "Complexity Modeling and Stability Analysis of Urban Subway Network: Wuhan City Case Study." Procedia - Social and Behavioral Sciences **96**(0): 1611-1621.

- Loo, B. P. Y. and A. H. T. Cheng (2010). "Are there useful yardsticks of population size and income level for building metro systems? Some worldwide evidence." Cities **27**(5): 299-306.
- Luo, W. and Y. Qi (2009). "An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians." Health & Place **15**(4): 1100-1107.
- Luo, W. and F. Wang (2003). "Measures of spatial accessibility to health care in a GIS environment: synthesis and a case study in the Chicago region." Environment and Planning B: Planning and Design **30**(6): 865-884.
- Newman, M. E. J. (2005). "A measure of betweenness centrality based on random walks." Social Networks **27**(39-54).
- Newman, M. E. J. (2010). Networks: An Introduction. Oxford, UK, Oxford University Press.
- Nicolas, D. (2013). "La planification urbaine française : théories, normes juridiques et défis pour la pratique." L'Information géographique **Vol. 77**: p. 45-70.
- McLafferty, S. and S. Grady (2004). "Prenatal Care Need and Access: A GIS Analysis." J. Med. Syst. **28**(3): 321-333.
- McLafferty, S. L. (2003). "GIS and health care." Annual Review of Public Health **24**: 25-42.
- MERLIN, P. and F. CHOAY (1988). Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. Paris, PUF: p.118-119.
- Pagliara, F. and E. Papa (2011). "Urban rail systems investments: an analysis of the impacts on property values and residents' location." Journal of Transport Geography **19**(2): 200-211.
- Perna, A., P. Kuntz and S. Douady (2011). "Characterization of spatial network-like patterns from junction geometry." Physical Review E **vol. 83**(Issue 6).
- Prasertsubpakij, D. and V. Nitivattananon (2012). "Evaluating accessibility to Bangkok Metro Systems using multi-dimensional criteria across user groups." IATSS Research **36**(1): 56-65.
- Prud'homme, R., M. Koning and P. Kopp (2011). "Substituting a tramway to a bus line in Paris: Costs and benefits." Transport Policy **18**(4): 563-572.
- Pailhou, J. (1970). La Reprs, J2 icyM. Koning and P. Kopp (2011). "Substituting a tramway Paris: Presses universitaires de France.
- Pepinster, J. (2010). Le mter, J. s universitaires de France
- RATP. (2013). "Plateforme opendata de la RATP." Retrieved January, 15, 2013, from <http://data.ratp.fr>.

- Radke, J. and L. Mu (2000). "Spatial Decompositions, Modeling and Mapping Service Regions to Predict Access to Social Programs." Annals of GIS **6**(2): 105 - 112.
- Roberts, M. J., E. J. Newton, F. D. Lagattolla, S. Hughes and M. C. Hasler (2013). "Objective versus subjective measures of Paris Metro map usability: Investigating traditional octolinear versus all-curves schematics." International Journal of Human-Computer Studies **71**(3): 363-386.
- Roth, C., S. M. Kang, M. Batty and M. Barthelemy (2012). "A long-time limit for world subway networks." Journal of The Royal Society Interface.
- Rushton G. (1999). "Methods to evaluate geographic access to health services." Journal of Public Health Management and Practice **5**(2): 93-100.
- Salat, S., C. Nowacki and D. Vialan (2010). Building Tomorrow Sustainable Cities. Shanghai, Urban Morphology Lab, CSTB.
- Shen, L., L. Jiao, B. He and L. Li "Evaluation on the utility efficiency of metro infrastructure projects in China from sustainable development perspective." International Journal of Project Management(0).
- Sheikh Mohammad Zadeh, A. and M. A. Rajabi (2013). "Analyzing the effect of the street network configuration on the efficiency of an urban transportation system." Cities **31**(0): 285-297.
- Sevtsuk, A. (2010). Path and Place: A Study of Urban Geometry and Retail Activity in Cambridge and Somerville, MA.
- Stephenson, K. A. a. Z., M. (1989). "Rethinking centrality: Methods and examples." Social Networks **11**: 1-37.
- STIF (2011). Les Transports en Commun en Chiffres.
- Tricoire, J. (1999). Un sie, J. Les Transports en Commun en Chiffres. ntrality: Meth Vie du rail.
- The World Bank and DRC of China (2014). Urban China: Toward Efficient, Inclusive, and Sustainable Urbanization. Development Research Center of the State Council.
- Tran, T.-D. and Y.-K. Kwon (2014). "Hierarchical closeness efficiently predicts disease genes in a directed signaling network." Computational Biology and Chemistry **53**, Part B(0): 191-197.
- Tilahun, N. and Y. Fan (2014). "Transit and job accessibility: an empirical study of access to competitive clusters and regional growth strategies for enhancing transit accessibility." Transport Policy **33**(0): 17-25.
- Tsai, Y.-H. (2009). "Impacts of self-selection and transit proximity on commute mode choice: evidence from Taipei rapid transit system." The Annals of Regional Science **43**(4): 1073-1094.



- Von Ferber, C., T. Holovatch, Y. Holovatch and V. Palchykov (2009). "Public transport networks: empirical analysis and modeling." The European Physical Journal B **68**(2): 261-275.
- Vuchic, V. R. (2005). Urban Transit: Operations, Planning, and Economics, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, N.J.
- Vuk, G. (2005). "Transport impacts of the Copenhagen Metro." Journal of Transport Geography **13**(3): 223-233.
- Wang, F., C. Chen, C. Xiu and P. Zhang (2014). "Location analysis of retail stores in Changchun, China: A street centrality perspective." Cities **41, Part A**(0): 54-63.
- Watts, D. J. and S. H. Strogatz (1998). "Collective dynamics of small world networks." Nature **VOL 393**.
- World Bank (2010). Urban Rail Development in China: Issues and Options, World Bank. **1**.
- Wuhan Statistical Bureau. (2006). "Wuhan statistical Yearbook 2006." Wuhan Press, from <http://www.whtj.gov.cn/documents/tjnj2008/index.htm>.
- World Bank and DRC of China (2014). Urban China: Toward Efficient, Inclusive, and Sustainable Urbanization. Development Research Center of the State Council.
- Xavier, D., N. Douay and V. Gagnière (2012). "Évolution des schémas, permanence des tracés : la planification de la région parisienne au prisme des réseaux ferroviaires." Géocarrefour **Vol. 87**: p. 209-224.
- Yang, D.-H., R. Goerge and R. Mullner (2006). "Comparing GIS-Based Methods of Measuring Spatial Accessibility to Health Services." Journal of Medical Systems **30**(1): 23-32.
- Zhao, J., W. Deng, Y. Song and Y. Zhu (2013). "What influences Metro station ridership in China? Insights from Nanjing." Cities **35**(0): 114-124.
- Zhang, J., M. Zhao, H. Liu and X. Xu (2013). "Networked characteristics of the urban rail transit networks." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **392**(6): 1538-1546.
- Zhang, J., X. Xu, L. Hong, S. Wang and Q. Fei (2011). "Networked analysis of the Shanghai subway network, in China." Physica A: Statistical Mechanics and its Applications **390**(23-24): 4562-4570.

# 攻读博士学位期间参加的科研项目和论文发表情况

## 一、科研项目

1. 法国国家科研署 (ANR) 项目 “Modèles Numériques de Morphogénèse Viaire (MONUMOVI)”, 即城市路网形态的数理模型研究, 2012年6月-2016年6月。
2. 世界银行研究项目: “Wuhan Urban Development Scenarios”, 2010年3月-2011年6月。
3. 深圳市规划局项目: “深圳市数字规划工程前期研究服务项目 (招标编号: SZGX07551)”, 2007年12月-2010年10月。

## 二、发表的学术论文

1. Zhan, Q., **Wang, X.**, Sliuzas, R., «Using a GIS-based method to assess the shortage areas of community health service - Case study in Wuhan, China». The International conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, (RSETE 2011).
2. **Wang, X.**, «Centralité des réseaux du métro» 发表于Clément-noel DOUADY主编: «De la trace à la trame: La voie, lecture du développement urbain», p157-162, L'Harmattan出版社, ISBN: 978-2-343-04232-9, **2014年9月**.
3. **Wang, X.**, Zhan, Q., Bonnin, P., Douady, S., «Centrality analysis of metro network, a case study of Paris» The 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICCET 2015).

# 致谢

博士研究是一个漫长的过程，我经历了从研究之初的新鲜感和期待感，研究过程当中曾有过的种种担心和怀疑，到如今，终于将要完成博士阶段的学习，却早已褪去了的浮躁心境。在这个漫长的过程中，我不仅掌握了研究方法，锻炼了各项技能，学习了相关领域的知识，同时也经过了历练，完成了成长和蜕变的过程。不论是在此过程中的哪个阶段，我都得到了很多来自老师、同学、家人和朋友的帮助。衷心的感谢他们陪伴我走过人生的这一段路。

首先要感谢的是我的导师詹庆明教授。非常感谢他多次在我人生的重要阶段为我提供了十分宝贵的机会。非常感谢他耐心的教导，引导我从纯粹的 GIS 技术学习转变到利用技术手段来研究和分析城市问题，让我找到了我所认为有意义和价值，并愿意努力一生的方向。感谢詹老师对我的包容和支持，让我有机会能够去法国游学，丰富了我的研究经历。

还要感谢我的法国导师 Pilippe Bonnin 教授。非常感谢他对我的严格要求，对我的法语论文事无巨细的指导和修改。非常感谢他虽然不同意我去法国开发署实习的决定，但仍然能够尊重我的选择。感谢他能够帮助我融入法国的研究团队，让我在团队例会上做研究报告，敦促我的研究进展。

非常感谢巴黎七大物理系的 Stéphane Douady 教授，为我的论文研究方法提出了非常重要的指导意见，他的睿智让我感到钦佩。感谢杜安迪先生为我提供的许多无私的帮助，他的敬业精神也是我值得一生学习的榜样。感谢 Morphocity 研究组的成员们对我的关心和照顾，让我在异国他乡能够专心致力于学习研究。

感谢李军老师和黄正东老师为我的论文提出了许多中肯的建议，在论文撰写的关键阶段给我很多启发。

感谢 1517 工作室的老师和同学们对我的关心和照顾，大家对科研的热爱感染着我，也带动着我在这样踏实的环境中和大家一起学习。

最后要感谢我的父母和我的发小，感激他们从始至终对我的关爱和无条件的支持，陪我走过了这段旅程中的起起伏伏。

致谢人：王曦

2016年5月24于武汉