

Société de Calcul Mathématique, S. A.  
*Algorithmes et Optimisation*



## **Le métro du "Grand Paris"**

*Livre blanc à l'attention des décideurs*

Société de Calcul Mathématique SA

Juin 2011

## Résumé opérationnel

L'objectif de ce document est de fournir aux décideurs des arguments clairs et factuels permettant de choisir le système de transport automatique le plus adapté au projet de métro du Grand Paris.

Après avoir défini l'ensemble des indicateurs d'aide à la décision, la comparaison de métros automatiques de dernière génération sur roulement pneu ou fer permet d'obtenir les conclusions générales suivantes :

- **Le métro du Grand Paris en petite couronne**

L'homogénéité des déplacements en petite couronne nécessite de mettre en place un tracé sans rupture de charge avec une capacité pouvant atteindre 35 000 à 40 000 Personnes Par Heure et Par Direction (pphpd) sur toute la zone. Pour permettre les comparaisons entre systèmes, nous avons défini, de manière arbitraire, dix trajets-types. Sur la base de ces trajets, le métro sur roulement pneu paraît le mieux adapté à cette zone car il permet de réduire d'environ 8 % les temps de parcours « porte à porte » par rapport au métro sur roulement fer.

- **Le métro du Grand Paris en moyenne couronne**

Les tracés de la Grande Rocade Est et du Plateau de Saclay, situés en moyenne couronne, sont homogènes en termes de déplacements : la variation de la capacité entre les heures de pointe et les heures creuses nécessite de mettre en place un métro automatique à capacité adaptée. Le métro sur roulement fer a l'avantage d'avoir une vitesse commerciale légèrement supérieure.

La moyenne couronne ayant une urbanisation moins dense, il est possible de construire une ligne en grande partie aérienne, ce qui permettrait de diminuer d'environ 46 % les coûts de construction par rapport à une ligne souterraine profonde. Le relief étant relativement accidenté dans cette zone, le métro sur roulement pneu est plus adapté à la mise en place d'une telle ligne.

Comme l'indique le rapport Auzannet (2011), nous suggérons de relier, à plus long terme, les tracés de la Grande Rocade Est et du Plateau de Saclay afin de mettre en place une ligne mixte voyageurs-fret. La capacité de fret de la ligne permettrait de diminuer pour partie le fret routier sur la zone concernée en réduisant les temps de parcours et les émissions de CO<sub>2</sub>.

## ***Définition des indicateurs***

Du point de vue de l'utilisateur, les indicateurs permettant d'évaluer la qualité du service sont les suivants :

- Le temps de parcours voyageur « porte à porte » ;
- La proximité des stations ;
- La régularité du métro ;
- Le temps d'attente des voyageurs sur les quais ;
- Le maintien de la qualité de service aux heures creuses ;
- Le sentiment de sécurité.

Les indicateurs relatifs aux intérêts de la collectivité sont les suivants :

- Les dépenses d'investissements (CAPEX) ;
- Les dépenses de fonctionnement (OPEX) ;
- L'éco-efficacité du réseau ;
- La possibilité de l'intégration du fret.

## ***Comparaison de métros sur roulement pneu et fer***

### ***Trois tracés étudiés au sein du Grand Paris***

Le projet de métro du Grand Paris concerne une aire très large ; les deux zones suivantes présentent des caractéristiques analogues :

1. La Petite Couronne : cette zone, représentée en orange sur la Figure I, se caractérise par la présence de multiples arrêts. La longueur interstation est donc assez faible. Cette partie du tracé sera réalisée presque en totalité en tunnel ;
2. Le plateau de Saclay et la Grande Rocade Est : cette zone, signalée en vert sur la figure I, se caractérise par une distance interstation plus élevée et par un relief difficile. Une solution qui s'adaptera au terrain existant permettra de faire de larges économies. De plus, il s'agit d'une zone moins urbanisée pour laquelle des solutions aériennes sont donc envisageables.

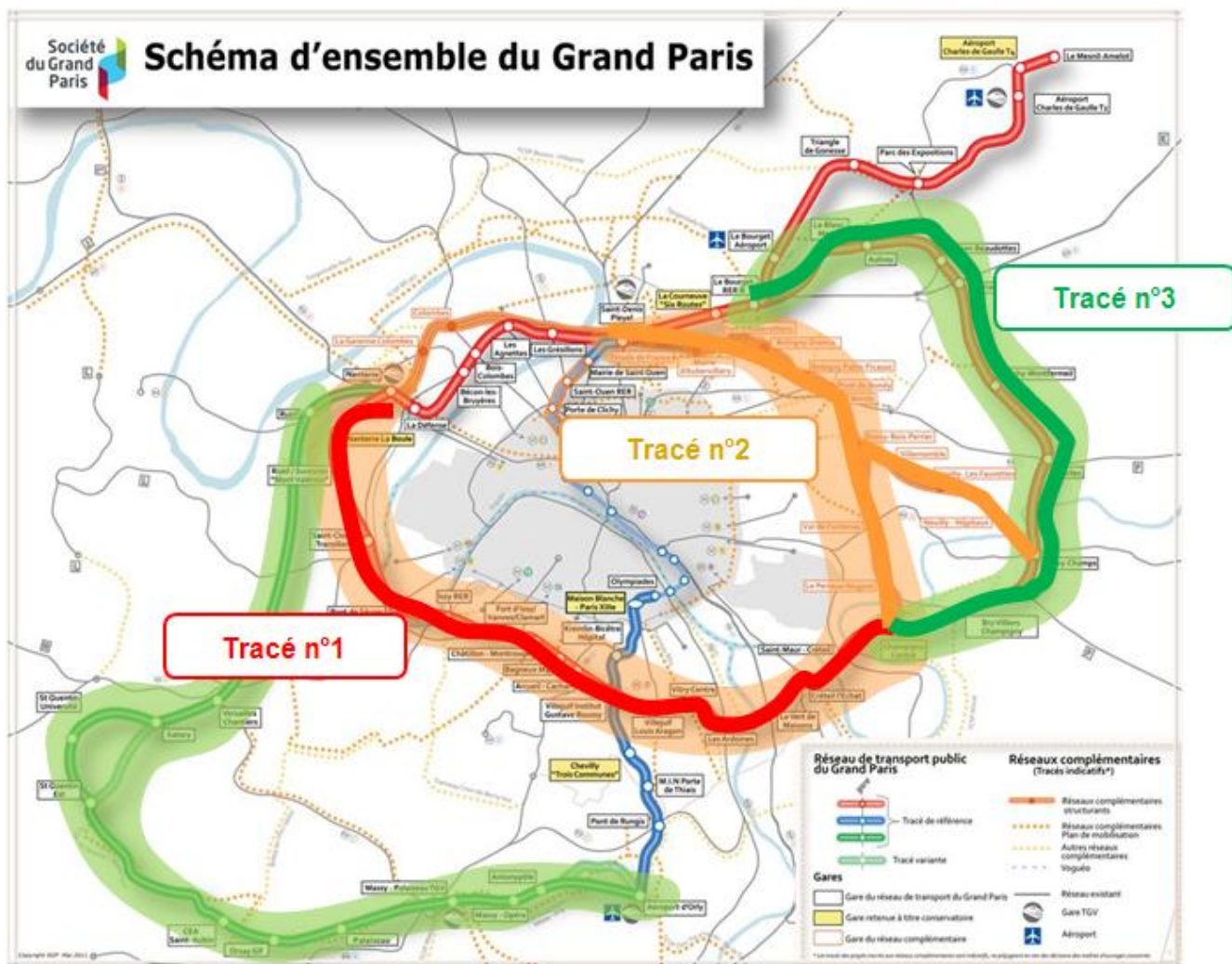


Figure I : Les trois tracés étudiés au sein du Grand Paris

La présente étude se concentre sur les trois tracés pour lesquels la comparaison entre un métro sur roulement pneu et un métro sur roulement fer est la plus pertinente (figure I). Les caractéristiques de ces trois tracés sont les suivantes :

- Tracé n°1 : de la Défense à Champigny Le Plant. Il fait un total de 30,5 km, distance calculée à vol d'oiseau entre chaque station. Le tracé est composé de 17 stations. La distance moyenne interstation est de 1,9 km.
- Tracé n°2 : de Champigny Le Plant ou Noisy-Champs à Carrefour Pleyel. Le tracé est composé de 15 stations pour une longueur totale de 29,5 km. La distance moyenne interstation est de 1,95 km.
- Tracé n°3 : de Champigny Le Plant au Bourget RER B. Le tracé est composé de 10 stations pour une longueur totale de 28,5 km. La distance moyenne interstation est nettement supérieure aux cas précédents : 3,15 km.

### ***Comparaison de la qualité de service (point de vue de l'utilisateur)***

Dans ce document, la qualité de service est évaluée par comparaison du temps de parcours « porte à porte », pour les deux systèmes ; ceci constitue l'indicateur le plus important du point de vue de l'utilisateur.

Les vitesses commerciales des métros sur roulement pneu et fer pour les trois tracés sont répertoriées dans le tableau I. Il s'agit de la vitesse moyenne utile à l'utilisateur.

Vitesse commerciale	Pneu (100km/h)	Fer (120 km/h)
Tracé n°1 et n°2 (1,9 et 1,95 km)	<b>55,5 km/h</b>	<b>54,5 km/h</b>
Tracé n°3 (3,15 km)	<b>66,5 km/h</b>	<b>67 km/h</b>

*Tableau I : Vitesses commerciales pour les deux systèmes sur les trois tracés*

Du point de vue de la qualité de service, le métro sur roulement pneu est plus rapide que le métro sur roulement fer pour les deux premiers tracés avec une vitesse moyenne de 55,5 km/h. En revanche, le troisième tracé présente une distance interstation plus élevée : 3,15 km. Le métro sur roulement fer est alors légèrement plus rapide avec une vitesse moyenne de 67 km/h contre 66,5 km/h pour le système pneu.

Afin de comparer la situation actuelle et celle après la réalisation du projet de métro du Grand Paris, dix trajets-types sont sélectionnés. Ceux-ci représentent des trajets qui sont et seront empruntés par un grand nombre des passagers. Ces trajets ont été choisis en fonction :

- de l'**intérêt stratégique des lieux** : les aéroports, les gares de trains grandes lignes, la Défense, etc. Les trajets qui répondent à cet objectif stratégique sont représentés sur la figure II en bleu ;
- de l'**intérêt social des lieux** : le maillage du réseau doit garantir une qualité de service identique pour l'ensemble des usagers. Les trajets qui répondent à un besoin social sont représentés sur la figure II en vert.

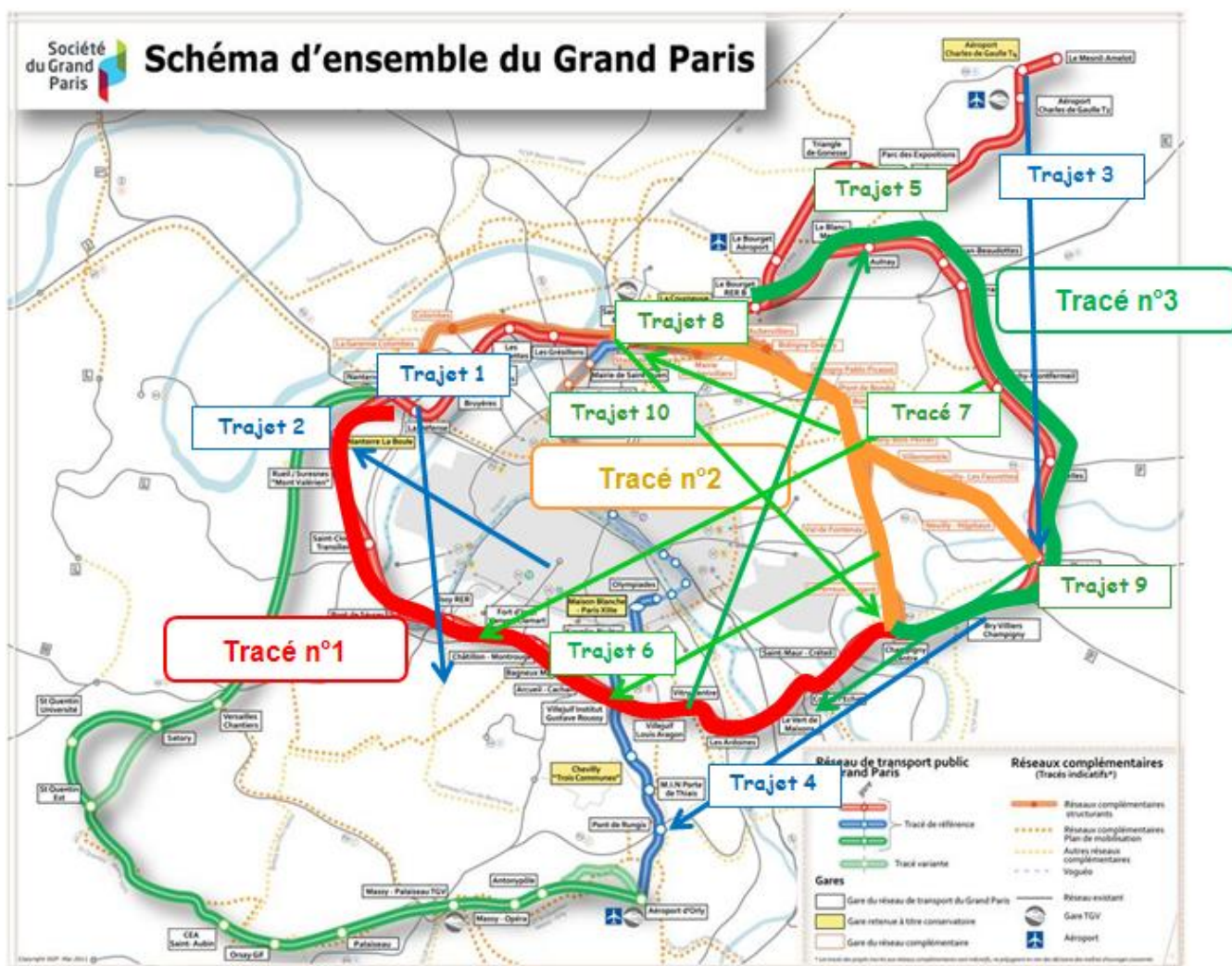


Figure II : Sélection des 10 trajets-types

Liste des dix trajets-types :

- 1) Place de La Défense, 92800, Puteaux → Rue des Fauvettes, 92320, Châtillon ;
- 2) Gare Montparnasse, 75015 Paris → Rue des Maris, 92500, Rueil-Malmaison ;
- 3) Aéroport Charles De Gaulle → Rue de la Butte Verte, 93160 Noisy-le-Grand ;
- 4) Boulevard de Strasbourg, Villiers-sur-Marne → Pont De Rungis Aéroport D'Orly, Thiais ;
- 5) Place de la Libération 94400 Vitry-sur-Seine → Rue de Lisbonne, 93600, Aulnay-sous-Bois ;
- 6) Rue de Coulmiers, 94130, Nogent-sur-Marne → Rue Camille Desmoulins, 94800, Villejuif ;
- 7) Boulevard Bargue, 93370 Montfermeil → Rue André Gide, 92320 Châtillon ;
- 8) Rosny 2, rue Léon Blum, 93110 Rosny-sous-Bois → Carrefour Pleyel, 93200, St-Denis ;
- 9) Rue de la Butte Verte, 93160 Noisy-le-Grand → Av du Général de Gaulle, 94000, Créteil ;
- 10) Rue Pleyel, 93200 Saint-Denis → Rue Eugène Brun, 94500, Champigny-sur-Marne.



Le tableau II permet de comparer le temps de parcours de « porte à porte » aux heures de pointe entre le réseau existant et le réseau du projet de métro du Grand Paris (intégrant les trois tracés sélectionnés uniquement). Pour ce dernier, les résultats sont précisés avec l'utilisation de métros sur roulement pneu ou fer.

Trajets types	Réseau existant	Pneu (100km/h)	Fer (120 km/h)
n°1	62 min	31,5 min	34 min
n°2	52 min	31,5 min	35 min
n°3	75 min	41 min	43 min
n°4	95 min	39 min	42 min
n°5	76 min	42 min	44 min
n°6	59 min	22 min	25,5 min
n°7	74 min	43,5 min	47 min
n°8	50 min	20 min	22,5 min
n°9	59 min	25 min	28 min
n°10	64 min	29,5 min	32 min
<b>TOTAL</b>	<b>666 min</b>	<b>325 min</b>	<b>353 min</b>

*Tableau II : Temps de parcours de « porte à porte » aux heures de pointe pour le réseau existant et le réseau intégrant les trois tracés étudiés (métro sur roulement pneu ou fer)*

Les conclusions de la comparaison de la qualité de service sont les suivantes :

- l'intégration des trois tracés permet de **diminuer de moitié** le temps de parcours « porte à porte » sur les dix trajets-types étudiés ;
- la performance du métro sur roulement pneu est légèrement meilleure avec **gain de temps « porte à porte » de – 8 %** sur les dix trajets-types étudiés par rapport au métro sur roulement fer.

### ***Comparaison du coût du génie civil (point de vue de la collectivité)***

Dans ce document, nous comparons le coût du génie civil pour les deux systèmes ; ceci constitue l'indicateur le plus important du point de vue de la collectivité.

Le tracé n°3 apparaît comme le plus intéressant pour réaliser une comparaison de coût lié au génie civil entre un système ferré profond et un système plus aérien et modulable avec pneu. Cette zone présente un niveau d'urbanisation assez faible, permettant ainsi la construction de cadres ouverts au sol et de viaducs pour certaines parties du trajet.

La figure III représente les profils pour le tracé n°3 d'une solution souterraine profonde (en bleu) et d'une autre solution moins profonde (en violet). La figure IV représente le profil d'une solution aérienne allongée de 3 km pour tenir compte de l'urbanisation et des infrastructures déjà présentes.

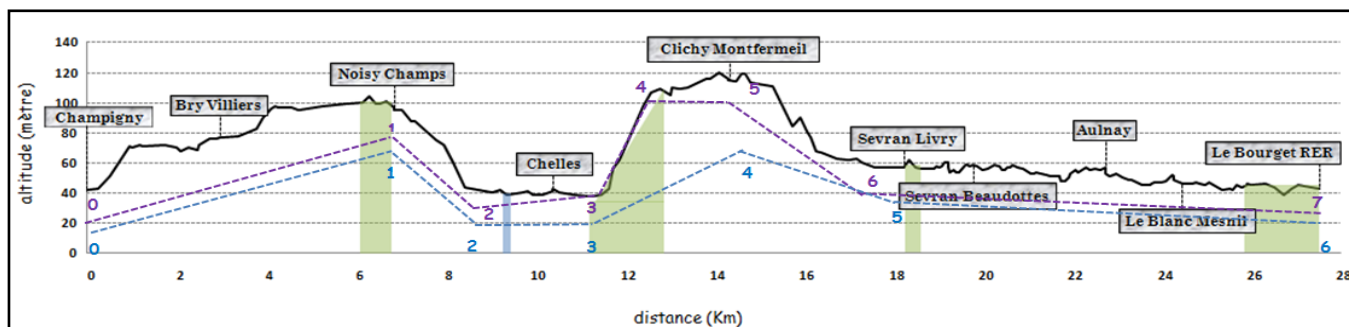


Figure III : Profil du tracé n°3 avec une solution profonde (bleu) et une solution peu profonde (violet)

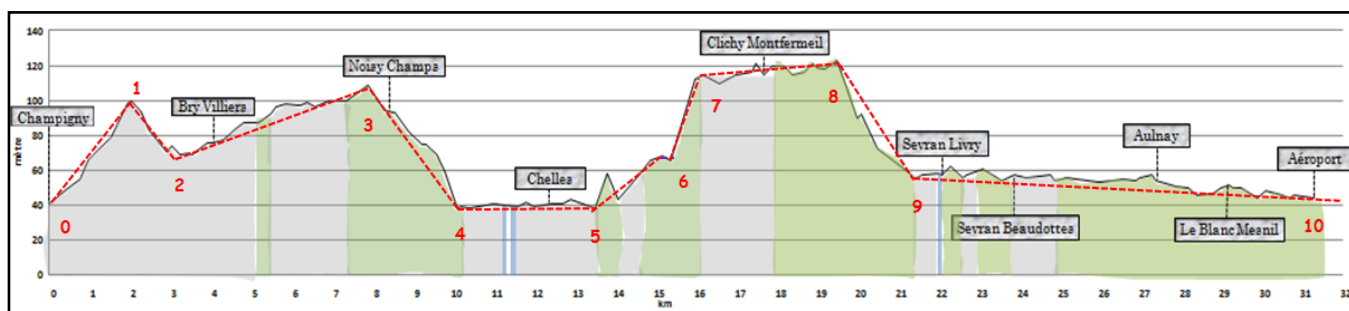


Figure IV : Profil du tracé n°3 avec une solution aérienne

Les résultats d'une estimation du coût du génie civil lié à la construction du tracé n°3 pour les trois solutions envisagées sont présentés sur le tableau III.

	Coût des 10 stations	Coût du tracé	Coût total
Système pneu avec tranchée couverte	49 M€	312 M€	361 M€
Système pneu souterrain	84 M€	560 M€	644 M€
Système ferré	107 M€	560 M€	667 M€

Tableau III : Estimation du coût du génie civil pour le tracé n°3

La différence entre les solutions profonde et peu profonde est minime, car seule la station de Clichy-Montfermeil serait construite à grande profondeur. Dans ces conditions, le **gain sur le génie civil** pour la solution adaptée au métro sur roulement pneu est de **- 3,5 %** par rapport au métro sur roulement fer.

En revanche, le métro sur roulement pneu permet d'envisager un **tracé aérien** pour lequel les économies sont très importantes. En effet, le gain se porte à la fois sur le coût des stations et sur le coût du tracé. Au total, le **gain sur le génie civil** pour la solution adaptée au métro sur roulement pneu est de **- 46 %** par rapport au métro sur roulement fer.



## Intégration du fret

Comme l'indique le rapport Auzannet (2011), nous suggérons de relier la Grande Rocade Est au Plateau de Saclay pour créer une ligne de métro-fret permettant d'effectuer les échanges entre les deux zones logistiques principales d'Ile-de-France :

- **l'espace Nord**, entre le port de Gennevilliers et l'aéroport de Roissy, centré sur Le Bourget (Seine-Saint-Denis) : les marchandises, traditionnellement liées à l'industrie, peuvent être acheminées vers le sud à partir de la station Le Bourget RER ;
- **l'espace Sud**, entre le port de Bonneuil et l'aéroport d'Orly, centré sur le marché de Rungis (Val-de-Marne) : les marchandises, principalement liées à la grande distribution et aux produits alimentaires, peuvent être acheminées vers le nord à partir de la station Rungis.

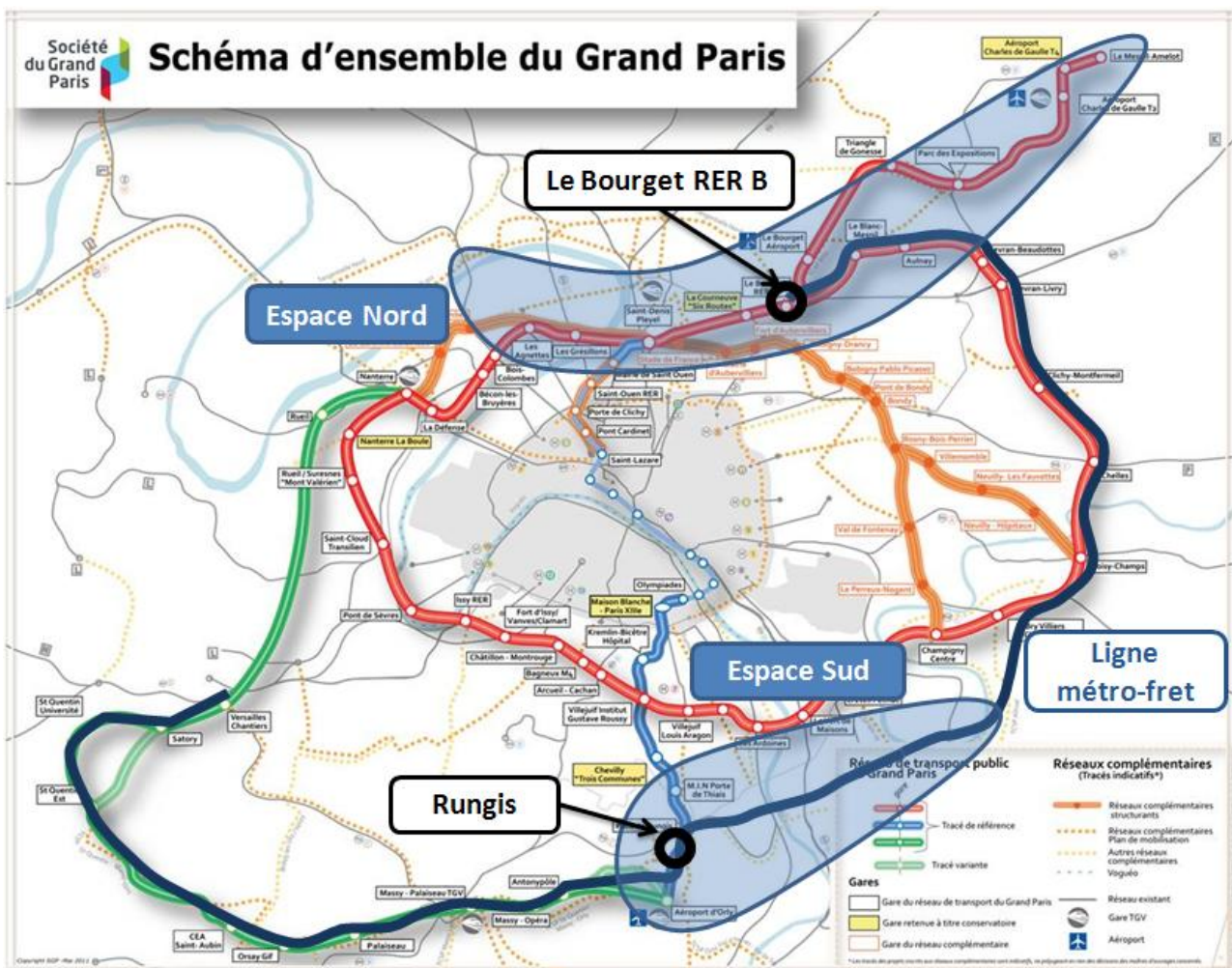


Figure V : Espaces logistiques Nord et Sud reliés par la ligne de métro-fret

Ce tracé relie 26 stations pour une longueur totale de 84 km. La distance interstation est en moyenne de 3,4 km, ce qui est cohérent avec la mise en place d'un métro rapide et à capacité adaptée.

Les flux par transport routier des marchandises adaptées au métro-fret entre l'Espace Nord et l'Espace Sud sont les suivants :

- flux de marchandises du 93 vers le 94 : **262 kt/an** ;
- flux de marchandises du 94 vers le 93 : **490 kt/an**.

La capacité théorique par direction de la ligne métro-fret est d'environ 5 600 kt/an. La ligne de métro-fret peut donc très largement remplacer le fret routier. En effet, le **métro-fret** est théoriquement capable d'acheminer **20 fois le flux routier allant du 93 au 94** et **10 fois le flux allant du 94 au 93**.

Afin de remplacer la totalité du transport routier entre l'Espace Nord et l'Espace Sud, soit une capacité d'environ 500 kt/an, le dimensionnement de la ligne de métro-fret au cours d'une journée d'exploitation allant de 6 h à minuit est le suivant :

- pendant les six heures de pointe : un **métro mixte toutes les 71 s** ;
- pendant les douze heures creuses :
  - un **métro mixte toutes les 107 s** ;
  - un **métro dédié par heure**.

En prenant une charge utile d'environ 19 t par camion, le **nombre de camions retirés** du parc routier en Ile-de-France est d'environ **14 000 camions par an** dans le sens **Le Bourget – Rungis**, et **26 000 par an** dans le sens **Rungis – Le Bourget**.

## ***Eco-efficacité***

En ce qui concerne le transport de voyageurs, la mise en place du nouveau réseau permet de **réduire de 93 %** les émissions de CO<sub>2</sub> des trajets actuellement effectués en voiture (réduction si l'on passe de la voiture aux transports en commun).

Avec 20 % de nouveaux voyageurs sur les trois nouveaux tracés (report modal), la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvera à environ 729 000 téqCO<sub>2</sub>/an. Comparé aux 8,5 millions de tonnes par an d'émission pour les véhicules légers en Ile-de-France, cela équivaut à une **réduction de 8,7 %**, conséquence du report modal des nouveaux voyageurs (figure VI).

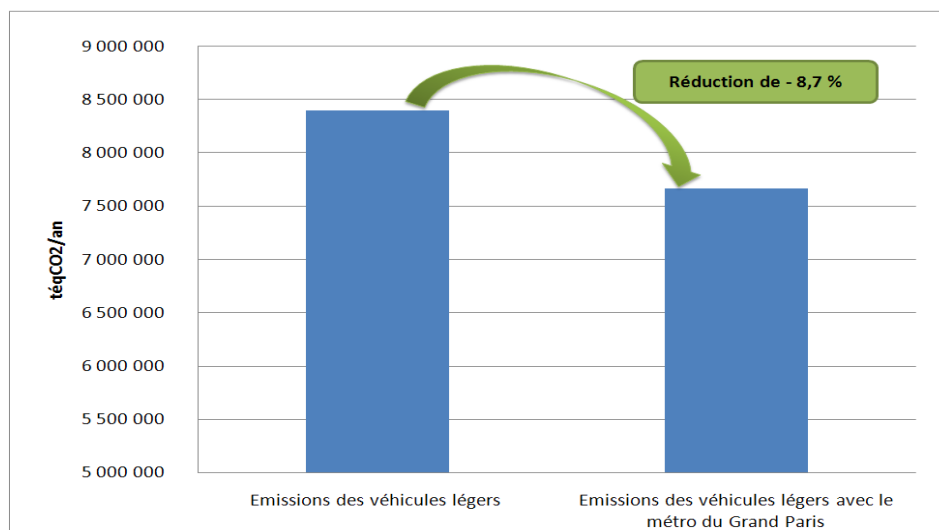


Figure VI : Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules légers en Ile-de-France avec l'intégration du métro du Grand Paris

En ce qui concerne le fret, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> est de **2,8 % par tonne et par kilomètre**. Pour une distance identique, la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> est donc relativement faible. Cependant, pour évaluer la diminution réelle, il est nécessaire de comparer les émissions en prenant en compte les distances réellement parcourues entre les points de collecte et de distribution (figure VII).

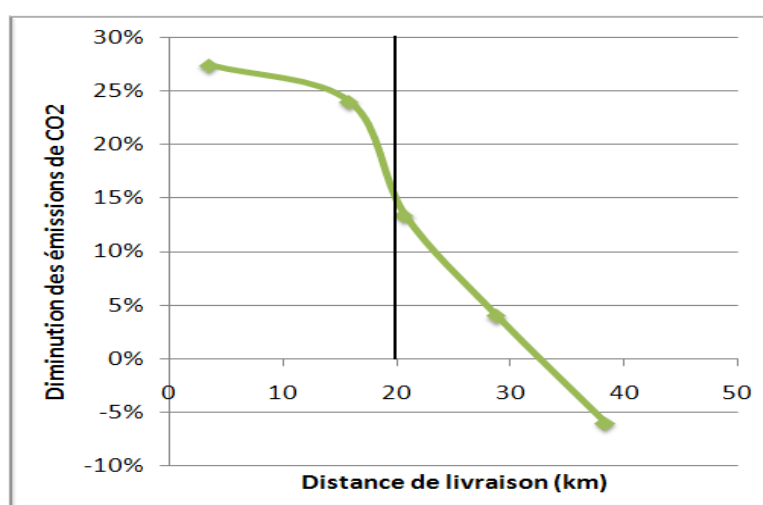


Figure VII : Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de la distance parcourue par rapport au transport routier pour des livraisons au départ du Bourget RER

Pour des livraisons allant jusqu'à 20 km, la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> est **supérieure à 15 %** par rapport au transport routier. En revanche, le tracé globalement circulaire de la ligne métro-fret en moyenne couronne augmente les distances par rapport à la route lorsque les livraisons sont trop espacées, ce qui diminue les réductions de CO<sub>2</sub>.

L'intégration du métro-fret au sein du Grand Paris est donc plus adaptée à des **livraisons de type collecte-distribution sur de courtes distances** qu'à des livraisons point à point effectuées sur de longues distances.

# Sommaire

Résumé opérationnel.....	2
Introduction.....	14
Chapitre 1 : Définition des indicateurs .....	17
1. Point de vue « Usager » .....	18
2. Point de vue « Collectivité » .....	19
Chapitre 2 : Le métro du Grand Paris.....	21
1. Le projet initial de la Société du Grand Paris .....	22
2. Le projet Arc Express .....	23
3. Un compromis : le métro du "Grand Paris" .....	24
4. Les tracés du métro du Grand Paris.....	25
4.1. Tracé n°1 .....	26
4.2. Tracé n°2 .....	27
4.3. Tracé n°3 .....	28
Chapitre 3 : Comparaison de métros automatiques sur roulement pneu ou fer .....	31
1. Comparaison de la qualité de service .....	32
1.1. Caractéristiques des systèmes de transport.....	32
1.2. Vitesses commerciales pour les trois tracés .....	32
1.3. Temps de parcours « porte à porte » pour les différents trajets types .....	33
1.3.1 Exemple : comparaison du trajet-type n°7 .....	35
1.3.2 Comparaison des dix trajets-types.....	36
2. Comparaison du coût du génie civil.....	38
2.1. Coût des infrastructures .....	38
2.2. Comparaison du coût du tracé n°3.....	39
3. Eco-efficacité.....	41
3.1. Ouvrages d'art.....	41
3.2. Diminution des émissions de CO <sub>2</sub> .....	42
3.3. Impact du report modal.....	43

Chapitre 4 : Intégration du fret .....	45
1. Tracé métro-fret .....	46
2. Exploitation de la ligne métro-fret.....	49
2.1. Mode d'exploitation de la ligne .....	49
2.2. Capacité théorique de la ligne métro-fret.....	50
3. Comparaison transport routier et métro-fret .....	51
3.1. Comparaison de la capacité de transport .....	51
3.1.1 Flux de marchandises entre la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne ....	52
3.1.2 Dimensionnement par rapport aux flux et aux contraintes techniques ...	52
3.2. Comparaison des temps de trajets.....	53
3.3. Comparaison des émissions de CO <sub>2</sub> .....	55
Références .....	57

## Introduction

Afin d'accompagner la croissance économique du Grand Paris, un vaste plan de développement en faveur des transports en commun a été lancé par l'Etat et la région Ile-de-France. Le 26 mai 2011, la Société du Grand Paris a émis un acte motivé prévu par l'article 3 de la loi du 3 juin 2010 relative au Grand Paris qui détaille le schéma d'ensemble du métro du Grand Paris. Celui-ci prévoit la création d'un nouveau réseau de plusieurs dizaines de kilomètres de lignes de métro automatique reliant les principaux points de la région Capitale. Ce projet répond donc à une vision stratégique de développement économique de la région Ile-de-France, mais également à une demande sociale permettant de relier les zones géographiques isolées autour de Paris et d'améliorer le maillage du réseau actuel.

Le présent document décrit l'ensemble des indicateurs permettant de choisir le système de transport le plus adapté. Il s'agit de mettre en place des indicateurs objectifs et factuels, permettant les comparaisons. Deux points de vue sont considérés pour définir les indicateurs : le point de vue de l'utilisateur et celui de la collectivité. Cette distinction permet de prendre en compte les préoccupations de ces deux intervenants majeurs du projet de métro du Grand Paris : le maître d'ouvrage et l'utilisateur final. En effet :

- l'utilisateur doit être satisfait du système proposé ; il faut donc évaluer la qualité de service proposée par l'ensemble du réseau ;
- les capacités de financement de la collectivité ne sont pas illimitées ; il faut donc choisir l'option présentant le meilleur rapport coût / efficacité.

Après avoir présenté les projets de la Société du Grand Paris et du STIF, le document décrit les trois tracés du métro du Grand Paris qui sont retenus dans le cadre de cette étude.

Ce document présente ensuite une étude de comparaison de l'intégration de métros automatiques de dernière génération sur roulement pneu ou fer au sein du métro du Grand Paris. Les deux systèmes sont comparés à partir des critères principaux des points de vue de l'utilisateur et de la collectivité. L'objectif est, là encore, de fournir aux décideurs des arguments clairs et factuels permettant de choisir le système de transport automatique le plus adapté au projet de métro du Grand Paris.

Pour étudier la qualité de service perçue du point de vue de l'utilisateur, dix trajets-types sont définis arbitrairement, afin de comparer les temps de parcours « porte à porte » obtenus en intégrant un métro sur roulement pneu ou fer. La SCM prend la responsabilité de ces choix. La définition "porte à porte" (et non "station à station" comme cela est fait d'habitude) est la plus pertinente pour l'utilisateur.



En ce qui concerne le point de vue de la collectivité, une étude du coût du génie civil est présentée, permettant de comparer une solution souterraine profonde avec une solution moins profonde ou aérienne, capable de mieux s'adapter à la topologie du terrain existant. L'analyse de l'éco-efficacité des deux systèmes est présentée à partir du volume des travaux à effectuer pour la construction des stations et de la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> liée au report modal de la voiture vers le métro.

L'intégration du métro-fret au sein du projet de métro du Grand Paris constitue une avancée technologique qui pourrait compléter les modes de transports actuels de marchandises. Ce document décrit la mise en place et le dimensionnement d'une ligne de métro-fret permettant de relier les principales zones logistiques d'Ile-de-France.



# Chapitre 1 :

## Définition des indicateurs

## 1. Point de vue « Usager »

Les deux indicateurs principaux permettant d'évaluer la qualité du service sont les suivants :

- Le **temps de parcours voyageur « porte à porte »** : il s'agit d'un critère déterminant pour l'utilisateur, lequel souhaite avoir la vision la plus large possible de l'offre de transport proposée. Cet indicateur n'a pas été suffisamment pris en compte jusqu'à maintenant.  
Il s'agit d'un critère d'attractivité fondamental, du point de vue de l'usager. Il y a, à l'heure actuelle, conflit entre le nombre de stations et vitesse commerciale : si le nombre de stations est élevé, chacun a une station proche de chez lui, mais la vitesse commerciale est impactée. Une solution qui permettrait d'augmenter le nombre d'arrêts sans pénaliser la vitesse commerciale aurait tous les suffrages.
- La **proximité** : le choix pour un usager d'utiliser le métro dépend fortement de la distance entre le point de départ et la station. Un tracé ayant des interstations courtes sera donc très attractif.
- La **régularité** : il s'agit d'un sujet de mécontentement permanent pour les usagers ; le système sélectionné doit donc éviter cet écueil.

D'autres indicateurs secondaires doivent être pris en compte afin de garantir une qualité de service optimale :

- Le **temps d'attente voyageur sur les quais** : cette attente est perçue très négativement par les usagers. Cet indicateur s'obtient indirectement à partir de la fréquence de passage et du temps d'arrêt du métro à quai. Ce temps d'arrêt dépend lui-même du rapport entre la largeur totale des portes et le nombre de passagers transportés ;
- La **qualité de service aux heures creuses** : l'attractivité du réseau de transport doit être maintenue toute la journée et éventuellement la nuit. Le système de transport doit donc être flexible pour s'adapter aux variations du trafic de voyageurs ;
- Le **sentiment de sécurité** : principalement aux heures creuses, l'attractivité du réseau est fortement liée à cet indicateur. Le sentiment de sécurité dépend des critères suivants : la présence de caméras, la fréquence de passage élevée, le taux de remplissage des voitures et la distance de parcours piéton en souterrain.

## 2. Point de vue « Collectivité »

Les indicateurs relatifs aux intérêts de la collectivité sont les suivants :

- Les **dépenses d'investissements** (CAPEX) constituent le critère prépondérant lors du choix du système de transport. Elles sont composées du coût du génie civil et du coût du matériel roulant et non-roulant. Chaque système implique la construction d'infrastructures spécifiques et le coût peut donc être très variable ;
- Les **dépenses de fonctionnement** (OPEX) : il s'agit d'estimer les dépenses liées à la maintenance, à la consommation d'électricité et à la masse salariale nécessaire pour exploiter le réseau ;
- Les indicateurs d'**éco-efficacité** concernent les économies de carburant, les réductions d'émission de gaz à effet de serre et les économies de temps de déplacement pour les automobilistes ;
- La possibilité de l'**intégration du fret** : évaluer l'attractivité de ce service dans le projet de métro du Grand Paris apparaît comme un élément distinctif et innovant.





## Chapitre 2 :

# Le métro du Grand Paris

## 1. Le projet initial de la Société du Grand Paris

Le projet initial de la Société du Grand Paris concerne une aire très large, composé de 155 km de lignes nouvelles et d'une quarantaine de gares, pour la plupart en correspondance avec le réseau de transport existant. Le projet est composé de deux rocade s'enroulant autour d'un axe central :

- La **petite rocade** autour de Paris, signalée en rouge, qui devrait relier Le Bourget à La Défense via l'Est et le Sud de l'agglomération, en assurant notamment la desserte directe de territoires limitrophes de la grande couronne à l'est.

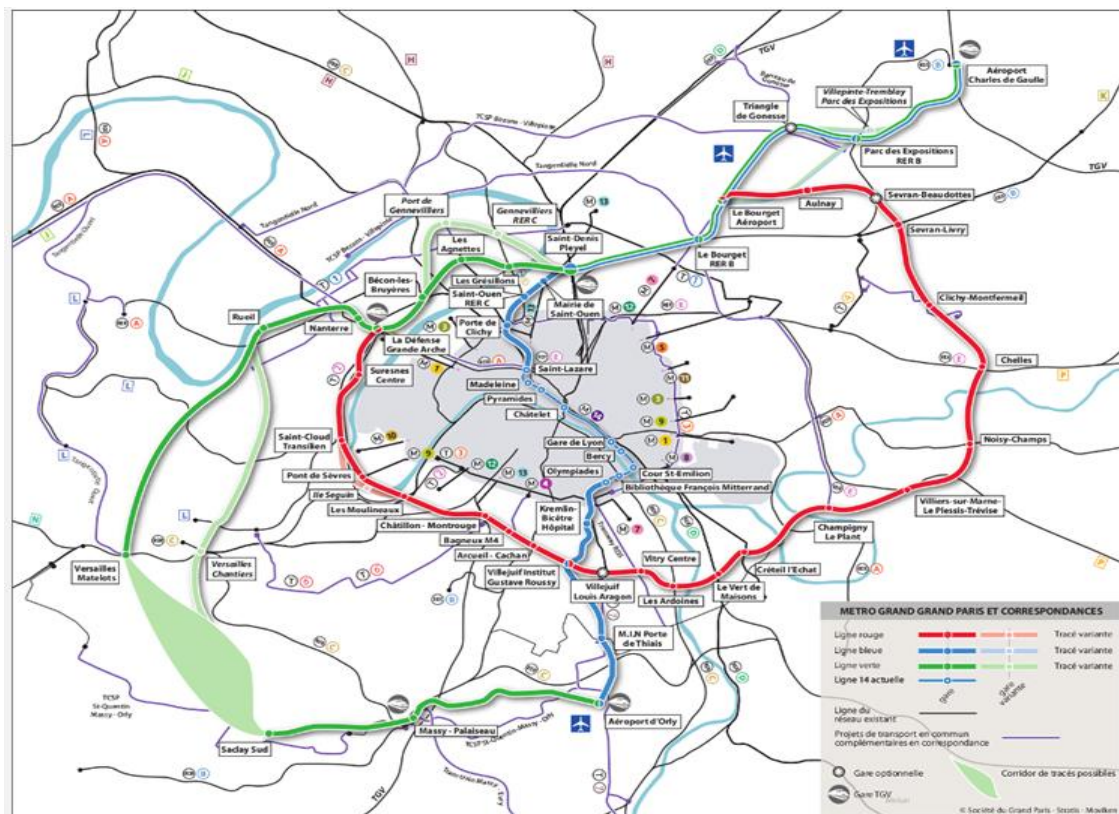
*60 km – 23 gares – entre 800 000 et 1,1 million de voyageurs par jour*

- La **grande rocade**, en vert, qui devrait relier l'aéroport Roissy-Charles de Gaulle à celui d'Orly via l'Ouest : La Défense, RUEIL, Versailles, avant de rejoindre au sud Saclay et Massy. Dans sa partie Nord, cette liaison comporte un tronç commun de 21 km avec la ligne 14 entre Saint-Denis et Roissy.

*75 km – 16 gares – entre 400 000 et 500 000 voyageurs par jour*

- La **prolongation de la ligne 14**, en bleu, constitue l'axe central du réseau qui devrait relier Roissy à Orly en passant par Paris. Elle prolongera la ligne 14 actuelle au nord et au sud.

*50 km – 22 gares – plus d'un million de voyageurs par jour*



Carte 1 : Projet initial du Grand Paris

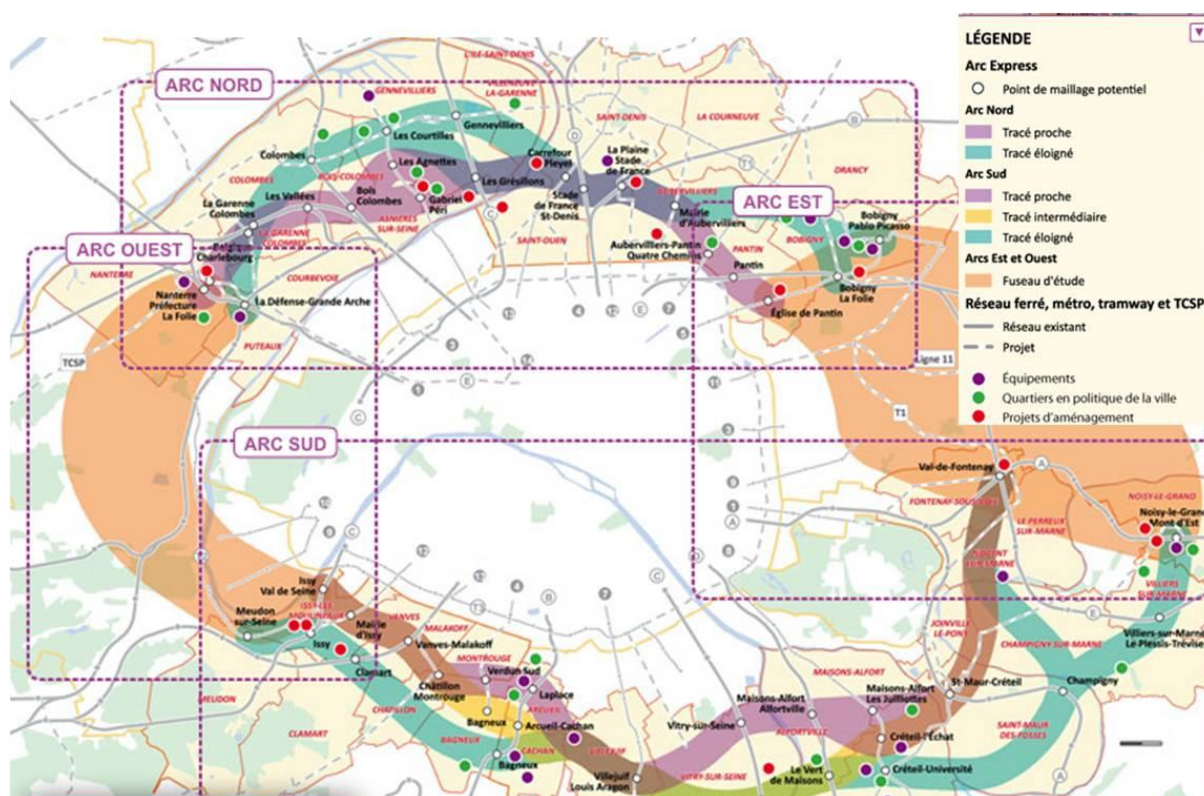
## 2. Le projet Arc Express

Lancé par la Région Ile-de-France en 2007, Arc Express est un projet de **métro automatique de rocade en petite couronne**. Il relierait ainsi des villes de banlieue entre elles en proche couronne, sans avoir à passer par Paris. Majoritairement souterrain, Arc Express comporterait environ 40 stations, en correspondance avec un grand nombre de lignes de transport en commun existantes ou en projet : métros, RER, Transiliens, tramways ou bus.

Le projet est composé de quatre arcs entourant la capitale. Les arcs Sud et Nord sont définis comme prioritaires, compte tenu de leurs enjeux de développement et de l'état de l'offre en transports collectifs.

Les caractéristiques du projet Arc Express sont les suivantes :

- 60 km pour la rocade entière ;
- 40 stations environ ;
- 1 km à 1,5 km de distance entre chaque station ;
- 40 km/h de vitesse commerciale ;
- Un matériel large, sur roulement fer, en automatisme intégral sans conducteur ;
- Temps d'attente entre 2 trains en heure de pointe qui pourra descendre à 1 min 30 ;
- 1 million de voyageurs attendus à terme sur l'ensemble de la rocade ;
- Tarification : la même que sur les autres lignes du réseau ferroviaire francilien.



Carte 2 : Projet Arc Express

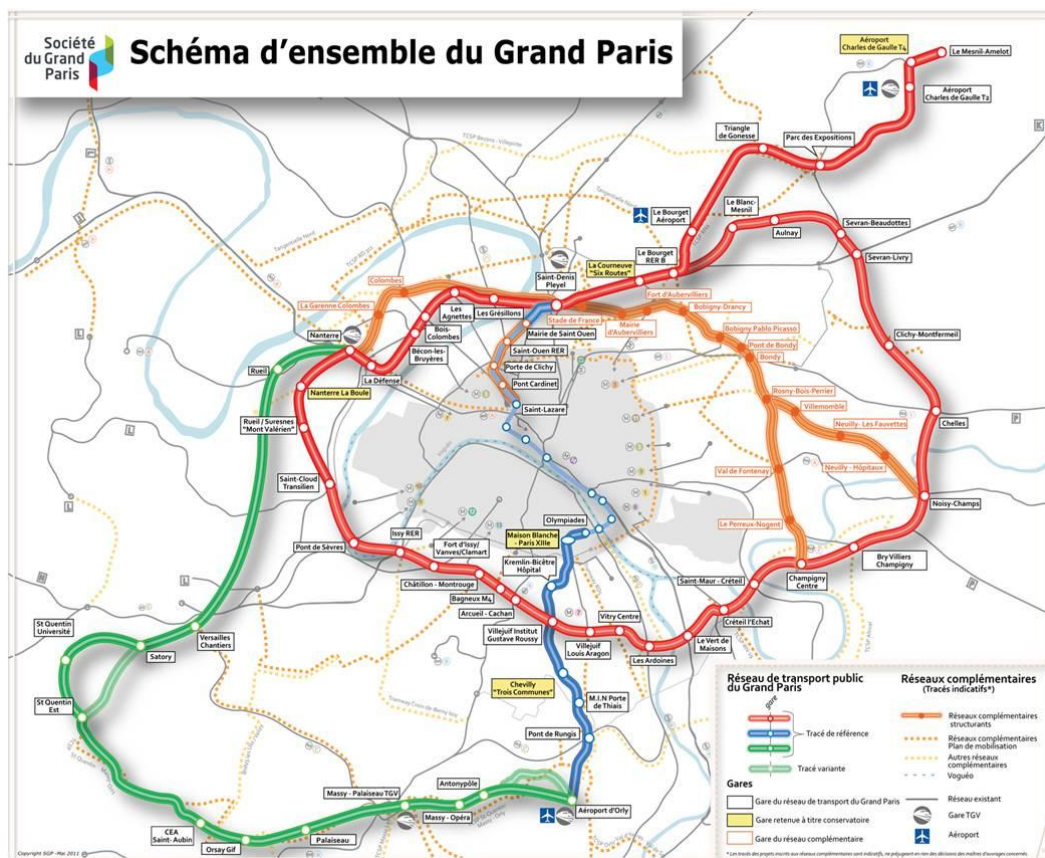
### 3. Un compromis : le métro du "Grand Paris"

Le 26 mai 2011, l'Etat et la région Ile-de-France ont finalisé le schéma d'ensemble du réseau appelé : métro du "Grand Paris". Le compromis, trouvé entre la Société du Grand Paris et le STIF, tient compte des éléments suivants :

- le prolongement de la ligne 14, la création de la Grande Rcade Est et la réalisation d'une ligne allant jusqu'à l'aéroport de Roissy sont retenus (projet initial de la Société du Grand Paris) ;
- le nombre de stations a été augmenté afin de mailler au mieux le réseau existant et l'Arc Est proche a été intégré au réseau (projet Arc Express) ;
- Les points de désaccord, qui concernaient la desserte du Plateau de Saclay et les tracés permettant de boucler le réseau à l'est, ont été levés.

Le schéma d'ensemble se compose de **quatre lignes de métro automatique de 205 km et de 63 gares nouvelles** :

- une **ligne rouge** *Le Bourget – Chelles – Villejuif – La Défense – Gonesse – Roissy / Le Mesnil-Amelot* de 95 km et 40 gares ;
- une **ligne bleue** *Orly – Saint-Denis Pleyel* de 30 km dont environ 9 km correspondent à la ligne 14 et 12 gares nouvelles ;
- une **ligne verte** *Orly – Versailles – Nanterre* de 50 km et 13 gares ;
- une **ligne orange** *Saint-Denis Pleyel – Noisy Champs ou Champigny* de 30 km et 16 gares (le prolongement au nord-ouest de Paris est prévu après 2025).



Carte 3 : Projet du métro du Grand Paris



## 4. Les tracés du métro du Grand Paris

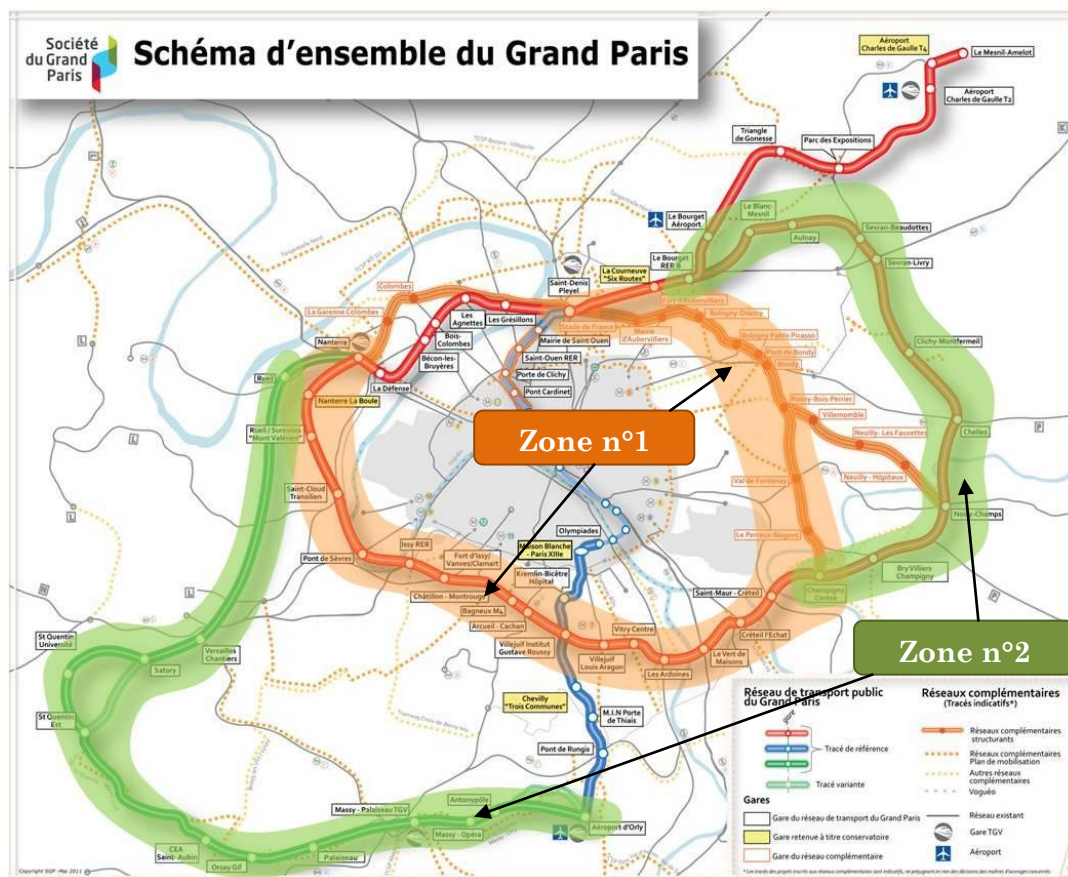
Dans le cadre de cette étude, la SCM s'est attachée à étudier les deux zones dont les caractéristiques différentes permettent de les distinguer :

- Zone n°1 : la **petite couronne** allant de la station La Défense à la station Saint-Denis-Pleyel en passant par Villejuif.

Ce tracé, signalé en orange, se caractérise par la présence de multiples arrêts. La longueur interstation est donc assez faible. Cette partie du tracé sera réalisée presque en totalité en tunnel ;

- Zone n°2 : la **moyenne couronne** qui est composée de deux parties :
  - Plateau de Saclay : Versailles → Aéroport d'Orly en passant par Massy ;
  - Grande Rocade Est : Champsigny Le Plant → Le Bourget.

Cette zone, signalée en vert, est moins urbanisée et se caractérise par une distance interstation plus élevée et un relief difficile.



Carte 4 : Les deux zones de caractéristiques différentes du Grand Paris

Les paragraphes suivants décrivent les trois tracés les plus appropriés à la comparaison de métros automatiques sur roulement pneu ou fer.

#### 4.1. Tracé n°1

Le premier tracé sélectionné est celui qui va de la Défense à Champigny Le Plant. Ce tracé est commun au projet initial de la Société du Grand Paris et au projet Arc Express. La figure ci-dessous représente le schéma de la ligne avec le nom et la distance interstation.

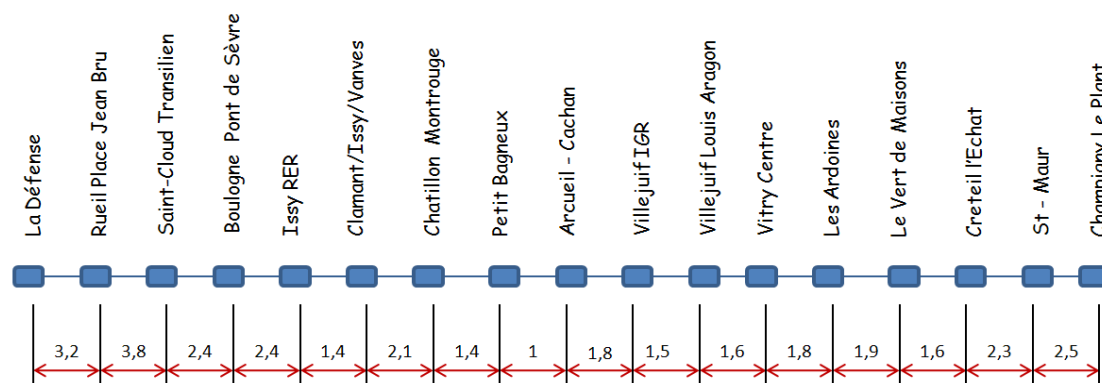
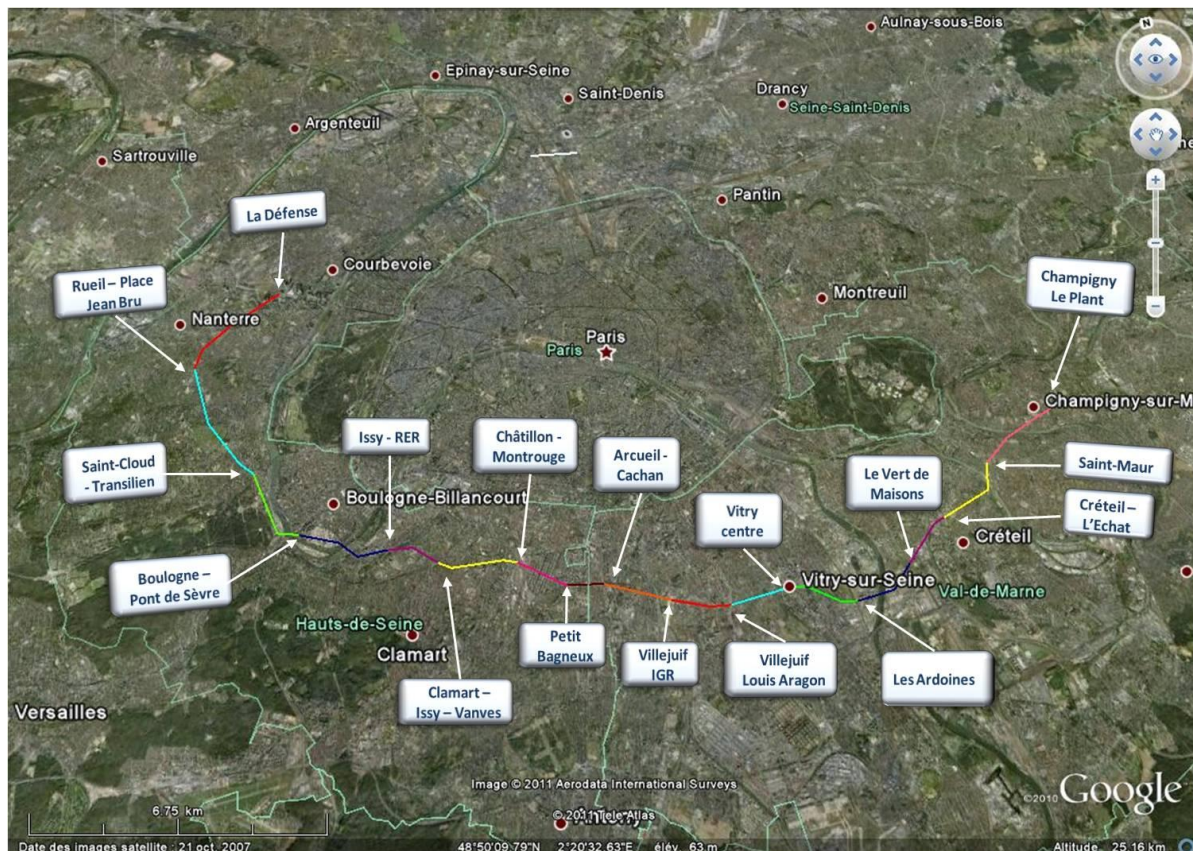


Figure 1 : La Défense - Champigny Le Plant (tracé n°1)

Ce tracé fait un total de 30,5 km, distance calculée à vol d'oiseau entre chaque station, et présente 16 interstations. La distance moyenne interstation est alors de 1,9 km.



Carte 5 : La Défense - Champigny Le Plant (tracé n°1)



## 4.2. Tracé n°2

Le second tracé correspond à l'Arc Est du métrophérique. Cet Arc Est proche est composé d'une branche commune entre Carrefour-Pleyel et Rosny-Bois-Perrier puis de deux branches : l'une reliant Champigny-Le-Plant par le Val-de-Fontenay, l'autre reliant Noisy-Champ par Neuilly-sur-Marne.

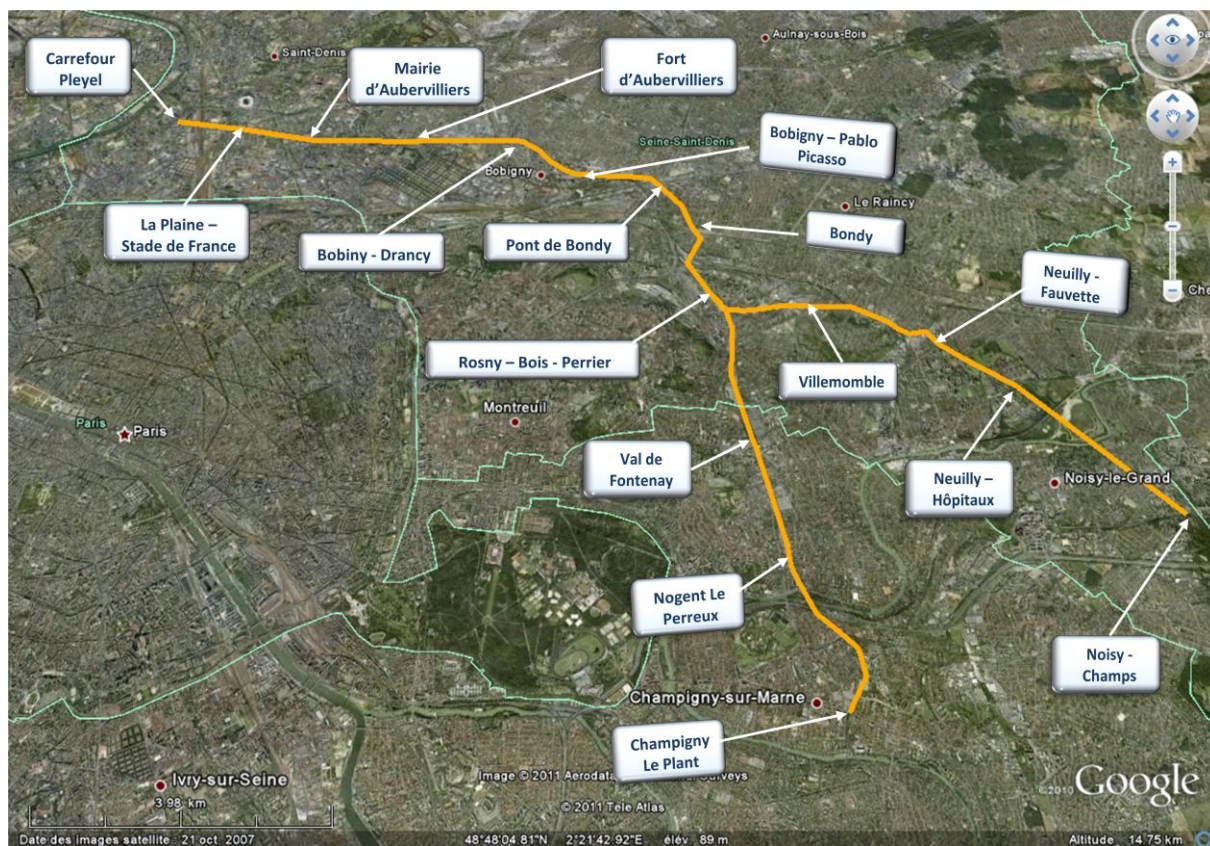
La figure ci-dessous représente le schéma de la ligne avec le nom et la distance interstation.



Figure 2 : Champigny Le Plant et Noisy-Champs – Carrefour Pleyel (tracé n°2)

Ce tracé fait un total de 29,5 km et présente 15 interstations. La distance moyenne interstation est de 1,95 km.

Voici la carte qui illustre ce tracé :



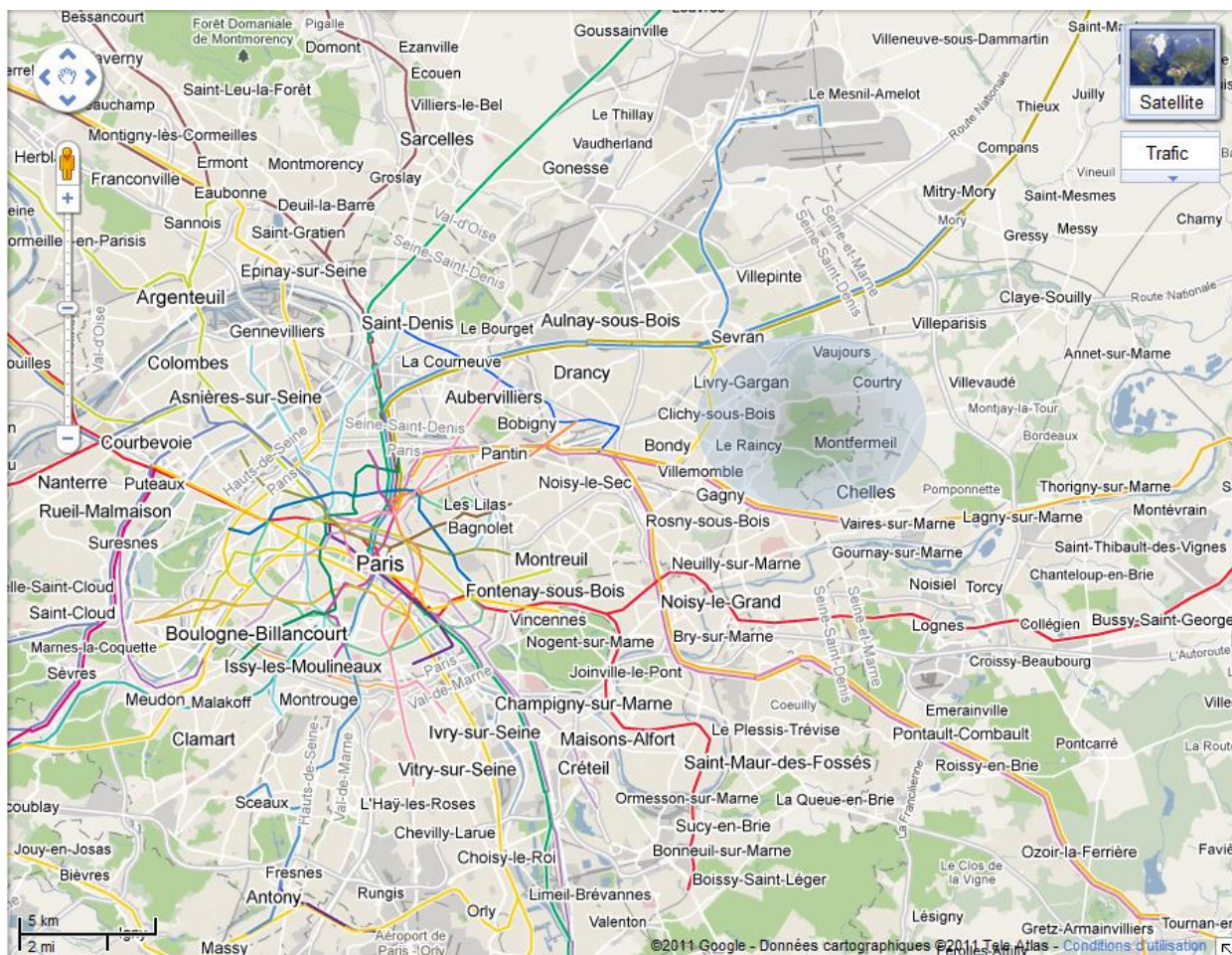
*Carte 6 : Champigny Le Plant et Noisy-Champs – Carrefour Pleyel (tracé n°2)*

#### 4.3. Tracé n°3

Le tracé n°3 correspond à la Grande Rocade Est. Cette proposition provient du projet Grand Paris et propose de relier Le Bourget à Champigny.

Du fait de la difficulté du relief mais aussi de la demande socio-économique de ce territoire, la communauté d'agglomération de Clichy-sous-Bois et Montfermeil a une importance particulière. Les réseaux disponibles de transport en commun dans cette région sont représentés ci-après.





*Carte 7 : Réseau de transport en commun de l'agglomération de Clichy-sous-Bois et Montfermeil*

Selon le dernier Recensement de la Population (Insee 2008), la population de l'agglomération de Clichy-sous-Bois et Montfermeil est évalué à 53 548 habitants. Malgré l'importance de ce territoire en termes de densité de population et aussi de surface, elle est totalement déconnectée de la capitale. Le RER E au sud et le RER B au nord entourent ces deux communes où les seuls moyens de transports disponibles sont le bus ou le tramway.

Le passage du métro du Grand Paris par cette zone représenterait donc une amélioration notable pour la population de ces communes. Toutefois, il n'est pas sans problème. Le fort dénivelé qui caractérise la région rend difficile le passage du métro. En fait, l'agglomération de Clichy-sous-Bois et Montfermeil est situé en hauteur, à 120 m d'altitude contre 40 m à Chelles et 60 m à Sevran-Livry.



Le tracé n°3 reliera Champigny-Le-Plant au Bourget RER B en passant par les stations suivantes :

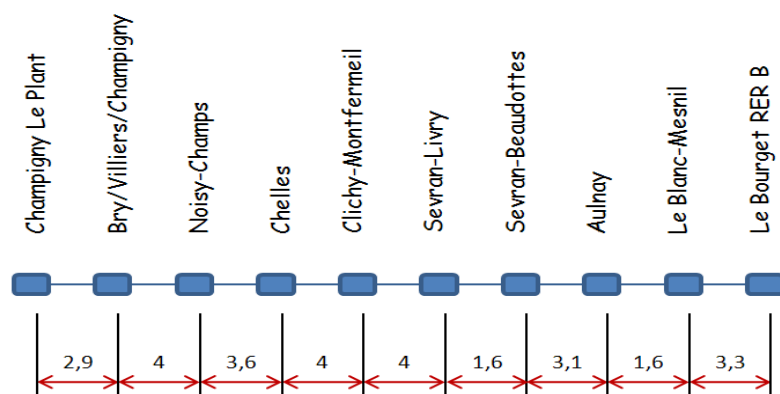


Figure 3 : Champigny Le Plant – Le Bourget RER B (tracé n°3)

Ce tracé fait un total de 28,5 km et présente 9 interstations. La distance moyenne interstation est nettement supérieure aux cas précédents : 3,15 km.

Voici la carte qui illustre ce tracé :



Carte 8 : Champigny Le Plant – Le Bourget RER B (tracé n°3)

# Chapitre 3 :

## Comparaison de métros automatiques sur roulement pneu ou fer

## 1. Comparaison de la qualité de service

Dans ce document, la qualité de service est évaluée par **comparaison du temps de parcours « porte à porte »**, pour les deux systèmes ; ceci constitue l'indicateur le plus important du point de vue de l'utilisateur.

### 1.1. Caractéristiques des systèmes de transport

Pour réaliser une comparaison des systèmes de transport qui sont susceptibles d'être choisis sur les différents tracés du métro du Grand Paris, nous sélectionnons les métros automatiques sur roulement pneu et fer de dernière génération.

Le matériel roulant est constitué de voitures de largeur standard de 2,8 mètres. La largeur des portes est supposée identique, ce qui permet un temps d'arrêt en station évalué à 31 s pour les deux métros.

Les caractéristiques qui distinguent les deux métros sont les suivantes :

Caractéristiques	Pneu	Fer
Accélération	1,3 m/s <sup>2</sup>	1 m/s <sup>2</sup>
Décélération	-1,14 m/s <sup>2</sup>	-1 m/s <sup>2</sup>
Vitesse maximale	100 km/h	120 km/h
Pente maximale	8 %	4 %

*Tableau 1 : Caractéristiques des métros sur roulement pneu ou fer*

### 1.2. Vitesses commerciales pour les trois tracés

Pour calculer les différents temps de parcours « porte à porte », il est nécessaire de déterminer les vitesses commerciales des deux systèmes pour les trois tracés.

La vitesse commerciale d'un système de transport correspond à la vitesse moyenne utile à l'utilisateur. Cette vitesse dépendant de la distance interstation, chaque système a une vitesse commerciale spécifique à chacun des trois tracés. Les tracés n°1 et n°2 ayant des distances interstation très proches, on leur associe la même vitesse commerciale.

Les vitesses sont calculées sur la base des caractéristiques techniques décrites au paragraphe précédent. La figure 4 représente les vitesses commerciales des métros sur roulement pneu et fer calculées en fonction de la distance interstation.



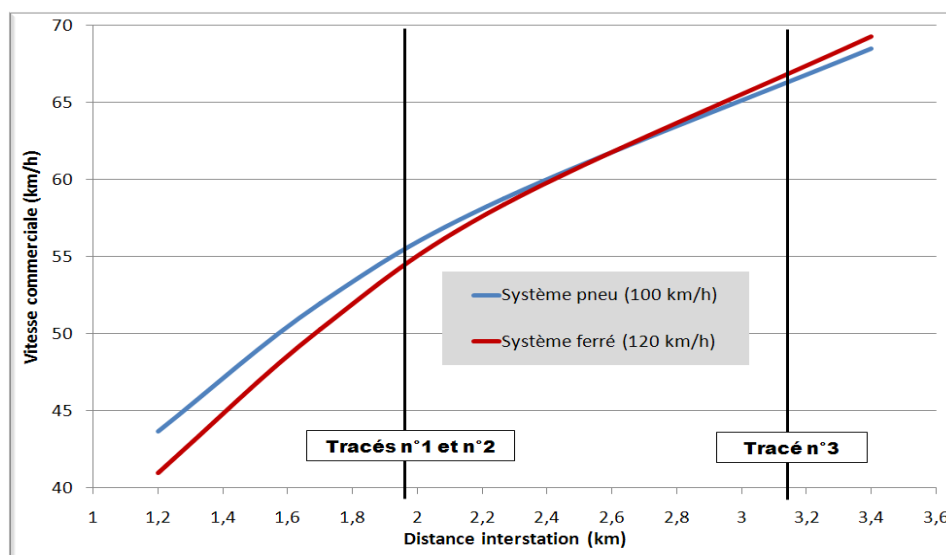


Figure 4 : La vitesse commerciale en fonction de la distance interstation, pour les deux systèmes

Sur la figure 4, on constate que le point de basculement de la vitesse commerciale se situe autour d'une distance interstation moyenne de 2,6 km. Pour des distances interstation inférieures à cette valeur, le métro sur roulement pneu permet de garantir une meilleure qualité de service. Au-delà d'une distance interstation de 2,6 km, le métro sur roulement fer est plus rapide.

Vitesse commerciale	Pneu (100km/h)	Fer (120 km/h)
Tracé n°1 et n°2 (1,9 et 1,95 km)	<b>55,5 km/h</b>	<b>54,5 km/h</b>
Tracé n°3 (3,15 km)	<b>66,5 km/h</b>	<b>67 km/h</b>

Tableau 2 : Vitesses commerciales pour les deux systèmes sur les trois tracés

Du point de vue de la qualité de service, le métro sur roulement pneu est plus rapide que le métro sur roulement fer pour les deux premiers tracés avec une vitesse moyenne de 55,5 km/h. En revanche, le troisième tracé présente une distance interstation plus élevée : 3,15 km. Le métro sur roulement fer est alors légèrement plus rapide avec une vitesse moyenne de 67 km/h contre 66,5 km/h pour le système pneu.

### 1.3. Temps de parcours « porte à porte » pour les différents trajets types

Afin de comparer la situation actuelle et celle après la réalisation du projet de métro du Grand Paris, dix trajets-types sont sélectionnés. Ceux-ci représentent des trajets qui sont et seront empruntés par un grand nombre des passagers. Ces trajets ont été choisis en fonction :

- de l'**intérêt stratégique des lieux** : les aéroports, les gares de trains grandes lignes, la Défense, etc. Les trajets qui répondent à cet objectif stratégique sont représentés sur la carte 9 en bleu ;

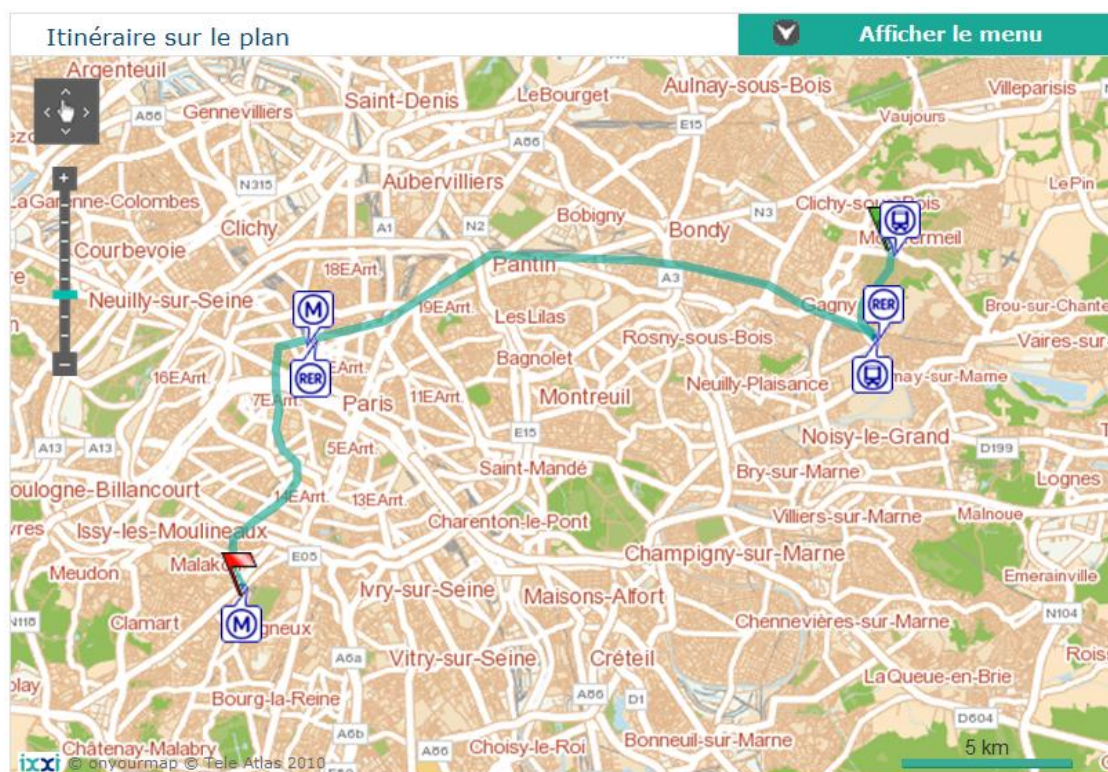


### 1.3.1 Exemple : comparaison du trajet-type n°7

Prenons comme exemple le trajet qui va de Clichy-Montfermeil à Châtillon. Il s'agit d'un trajet qui répond à un besoin social. Le temps de trajet de « porte à porte » est aujourd'hui de 1h14 en heure de pointe. Le passager doit prendre trois types de transports différents pour se rendre à sa destination finale : le bus, le RER E et enfin la ligne 13. Le trajet n'étant pas direct, le voyageur perd un temps considérable dans les correspondances : 21 minutes de marche à pied et de bus.

De plus, chaque système de transport a différents niveaux de fiabilité : selon le STIF, 95% des passagers qui prennent le RER E arrivent à l'heure ou avec un retard inférieur à 5 min à leur gare de destination. Pour la ligne 13, sans doute la plus problématique du réseau métropolitain, les résultats sont plus déficients : 90 % est le pourcentage du nombre réel de circulations par rapport au service commandé par le STIF aux heures de pointe. Concernant les bus, la fréquence de passage est de façon générale plus faible que pour les systèmes type métro ou RER, ce qui implique un temps d'attente important de 10 à 15 min. Le passager doit ainsi additionner les inconvénients de chaque moyen de transport.

Voici la carte qui illustre ce trajet avec le réseau actuel :



Carte 10 : Trajet Clichy-Montfermeil à Châtillon  
Temps de parcours de « porte à porte » en utilisant le réseau actuel

Avec la mise en place du métro du Grand Paris, le voyageur utilisera les tracés n°3 et n°1 pour relier Châtillon à partir de Clichy-Montfermeil.

Pour simuler les temps de parcours obtenus avec les métros sur roulement pneu et fer, les vitesses commerciales des deux systèmes sont utilisées. Le temps de marche à pied lors des correspondances est fixé à 30 s pour le métro sur roulement pneu et à 1 min 30 s pour le métro sur roulement fer. L'écart se justifie par une profondeur de station moins importante avec le système pneu et une meilleure flexibilité pour l'implantation des stations grâce à un rayon de courbure plus important. Une minute de marche supplémentaire correspond à une distance supplémentaire de 50 m en moyenne pour un piéton marchant à 3 km/h.

Les résultats obtenus sont nettement meilleurs que la situation actuelle : le temps de « porte à porte » est de 43,5 min pour le système pneu et de 47 min pour le système fer-  
ré.

Cette amélioration par rapport au réseau actuel s'explique d'une part, par la diminution du nombre de modes de transports nécessaires pour se rendre à la destination finale et d'autre part, par une diminution du temps de marche à pied. En fait, ce tracé prévoit un plus grand nombre d'arrêt intermédiaires, ce qui a un effet direct sur la diminution du temps de parcours total, autrement dit, le temps de parcours de « porte à porte ».

### 1.3.2 Comparaison des dix trajets-types

Le tableau 3 permet de comparer le temps de parcours de « porte à porte » aux heures de pointe entre le réseau existant et le réseau du projet de métro du Grand Paris (intégrant les trois tracés sélectionnés uniquement). Pour ce dernier, les résultats sont précisés pour les métros sur roulement pneu et fer.

Trajets types	Réseau existant	Pneu (100km/h)	Fer (120 km/h)
<b>n°1</b>	62 min	31,5 min	34 min
<b>n°2</b>	52 min	31,5 min	35 min
<b>n°3</b>	75 min	41 min	43 min
<b>n°4</b>	95 min	39 min	42 min
<b>n°5</b>	76 min	42 min	44 min
<b>n°6</b>	59 min	22 min	25,5 min
<b>n°7</b>	74 min	43,5 min	47 min
<b>n°8</b>	50 min	20 min	22,5 min
<b>n°9</b>	59 min	25 min	28 min
<b>n°10</b>	64 min	29,5 min	32 min
<b>TOTAL</b>	<b>666 min</b>	<b>325 min</b>	<b>353 min</b>

*Tableau 3 : Temps de parcours de « porte à porte » aux heures de pointe pour le réseau existant et le réseau intégrant les trois tracés étudiés (métro sur roulement pneu ou fer)*



L'intégration des trois tracés génère un gain de temps par rapport au réseau existant quel que soit le système de transport utilisé. En effet, le temps de parcours total des dix trajets-types est de 666 min avec le réseau existant alors qu'il ne serait que de 325 min et 353 min respectivement avec les métros sur roulement pneu et fer.

Les conclusions de la comparaison de la qualité de service sont les suivantes :

- l'intégration des trois tracés permet de **diminuer de moitié** le temps de parcours « porte à porte » sur les dix trajets-types étudiés ;
- la performance du métro sur roulement pneu est légèrement meilleure avec **gain de temps « porte à porte » de – 8 %** sur les dix trajets-types étudiés par rapport au métro sur roulement fer.

## 2. Comparaison du coût du génie civil

Du point de vue de la collectivité, le coût du génie civil est l'indicateur prépondérant dans le choix du système de transport. Les métros sur roulement pneu et fer sont comparés en fonction des différentes solutions de profil possibles sur le tracé n°3.

### 2.1. Coût des infrastructures

Le coût total des infrastructures du tracé varie en fonction de la solution proposée. Pour la construction de la ligne, il existe trois possibilités dont les coûts sont les suivants :

- cadre ouvert au sol (tranchée couverte) : 11 339 €/m ;
- viaduc bi-voies : 11 790 €/m ;
- tunnel circulaire bi-voies : 20 360 €/m.

Le coût de construction de la solution cadre ouvert au sol et du viaduc sont assez proches. Par contre, la solution tunnel circulaire représente un surcoût de 80 % supplémentaire par rapport au cadre ouvert au sol.

Le coût du génie civil lié à la construction des stations souterraines change en fonction de la profondeur de l'ouvrage et aussi de leur dimension. L'intervalle d'exploitation étant de 5 à 10 % plus court pour le système pneu, la longueur totale du métro permettant de transporter un nombre de passagers équivalent est également plus courte. Par conséquent, les dimensions des stations pour les deux systèmes sont différentes.

Par rapport aux 35 000 à 40 000 Personnes Par Heure et Par Direction (pphpd) envisagées en petite couronne, la capacité est évaluée à 15 000 pphpd en moyenne couronne. La densité des passagers ne pouvant pas dépasser 4 personnes /m<sup>2</sup>, les longueurs des stations du tracé n°3 sont donc les suivantes :

- Système pneu : 34 m de longueur ;
- Système ferré : 40 m de longueur.

Après avoir évalué la longueur des stations du tracé n°3, nous déterminons le coût de la construction des stations en fonction de leur profondeur. La figure 5 représente ce coût pour les métros sur roulement pneu et fer.

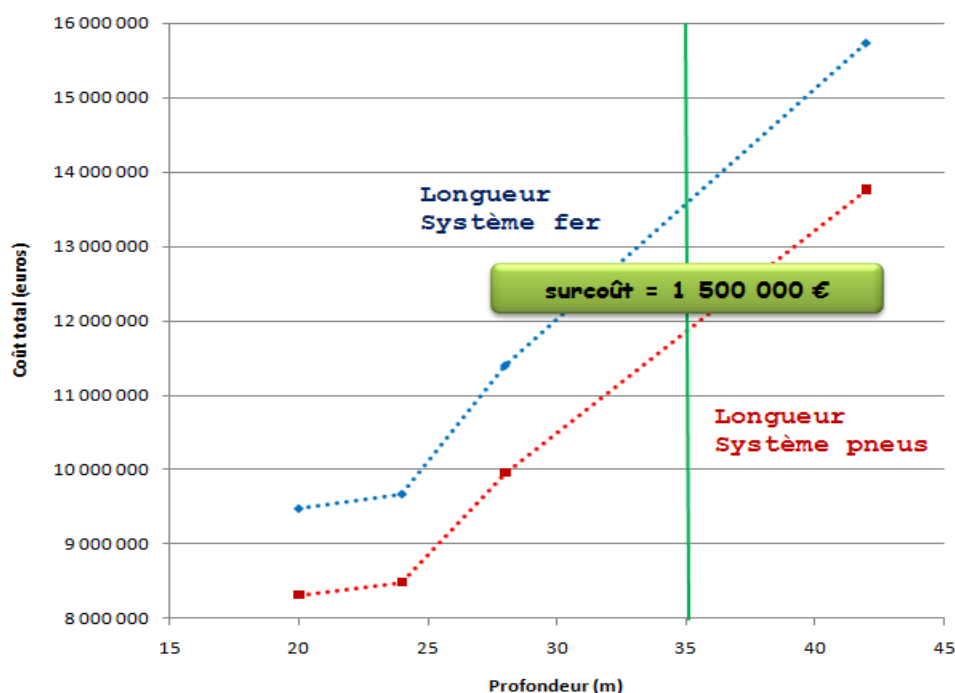


Figure 5 : Variation du coût des stations en fonction de la profondeur et de leurs dimensions

La profondeur de la station a un impact très important sur le coût du génie civil. Par exemple, pour atteindre les 15 000 pphpd avec le métro sur roulement fer, le coût est estimé à 10 M€ pour 25 m de profondeur alors que pour 35 m le coût est de 13,5 M€, soit plus de 3,5 M€ pour 10 m de profondeur supplémentaire.

## 2.2. Comparaison du coût du tracé n°3

Le tracé n°3 apparaît comme le plus intéressant pour réaliser une comparaison de coût lié au génie civil entre un système ferré profond et un système plus aérien et modulable avec pneu. Cette zone présente un niveau d'urbanisation assez faible, permettant ainsi la construction de cadres ouverts au sol et de viaducs pour certaines parties du trajet.

La figure 6 représente les profils pour le tracé n°3 d'une solution souterraine profonde (en bleu) et d'une autre solution moins profonde (en violet).

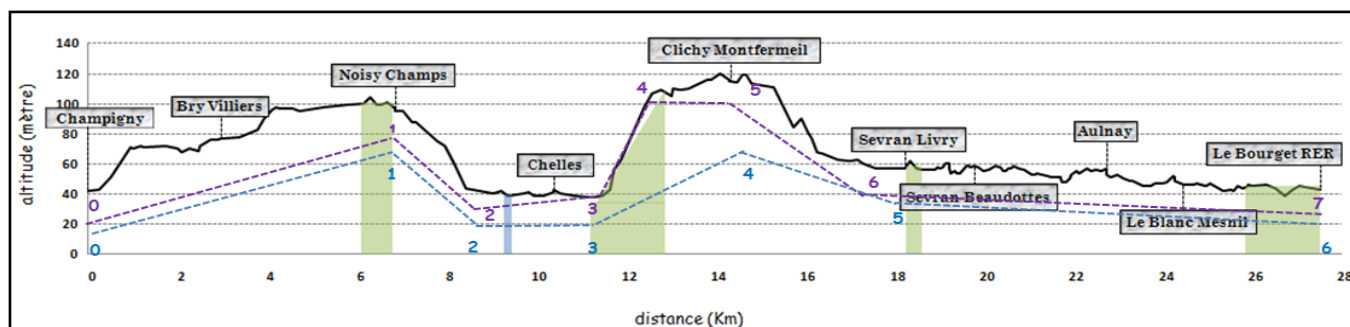


Figure 6 : Profil du tracé n°3 avec une solution profonde (bleu) et une solution peu profonde (violet)

La construction de la ligne avec des cadres ouverts au sol et des viaducs pour certaines parties du trajet nécessite de modifier légèrement le tracé pour tenir compte de l'urbanisation et des infrastructures déjà présentes. La solution proposée allonge le tracé n°3 de 3 km, le profil du tracé est présenté sur la figure 7.

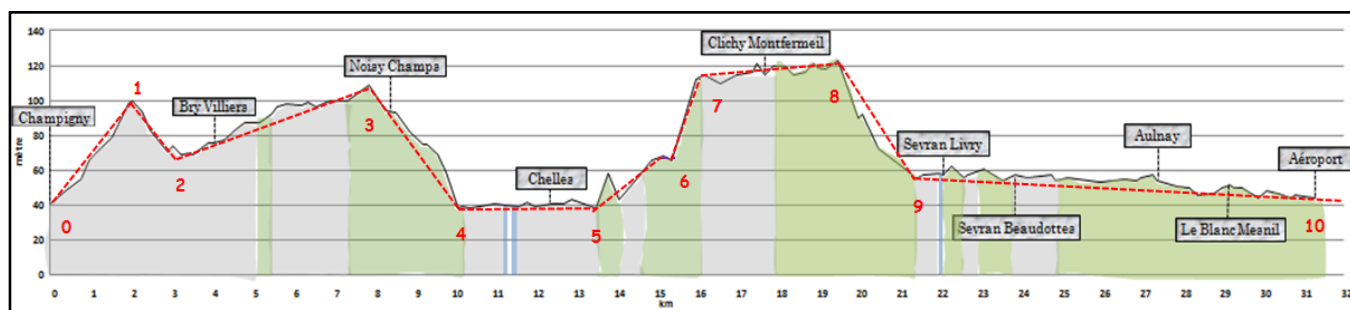


Figure 7 : Profil du tracé n°3 avec une solution aérienne

Les résultats d'une estimation du coût du génie civil lié à la construction du tracé n°3 pour les trois solutions envisagées sont présentés sur le tableau 4.

	Coût des 10 stations	Coût du tracé	Coût total
Système pneu avec tranchée couverte	49 M€	312 M€	<b>361 M€</b>
Système pneu souterrain	84 M€	560 M€	<b>644 M€</b>
Système ferré	107 M€	560 M€	<b>667 M€</b>

Tableau 4 : Estimation du coût du génie civil pour le tracé n°3

La différence entre les solutions profonde et peu profonde est minime, car seule la station de Clichy-Montfermeil serait construite à grande profondeur. Dans ces conditions, le **gain sur le génie civil** pour la solution adaptée au métro sur roulement pneu est de **- 3,5 %** par rapport au métro sur roulement fer.

En revanche, le métro sur roulement pneu permet d'envisager un tracé tout en tranchées couvertes avec certaines parties en viaduc pour lequel les économies sont très importantes. En effet, le gain se porte à la fois sur le coût des stations et sur le coût du tracé. Au total, le **gain sur le génie civil** pour la solution adaptée au métro sur roulement pneu est de **- 46 %** par rapport au métro sur roulement fer.



### 3. Eco-efficacité

#### 3.1. Ouvrages d'art

Ce paragraphe se focalise sur la comparaison de l'ampleur de travaux à effectuer entre un tracé peu profond associé à un métro sur roulement pneu et un tracé plus profond associé à un métro sur roulement fer.

Le volume de terre à excaver se détermine en fonction de la profondeur des stations de chaque ligne. En considérant un flux de 15000 pphpd pour le tracé n°3, la longueur des quais pour un métro sur roulement fer est de 40 m contre 34 m pour les quais du métro sur roulement pneu. De plus, la profondeur des infrastructures dépend de la position des stations sur le tracé.

La relation entre le volume et la profondeur de chaque station est répertoriée dans le tableau ci-dessous :

Tracé n°3				
	Profondeur (m)		Volume de terre excavée (m <sup>3</sup> )	
Stations	Pneu	fer	Pneu	fer
Champigny	20	25	13 356	17 640
Bry Villiers	25	35	16 506	23 940
Noisy Champs	20	25	13 356	17 640
Chelles	10	20	7 056	14 490
Clichy Montfermeil	20	45	13 356	30 240
Sevran livry	20	25	13 356	17 640
Sevran Beaudottes	20	25	13 356	17 640
Aulnay	20	25	13 356	17 640
Le Blanc Mesnil	20	25	13 356	17 640
Le Bourget RER	20	25	13 356	17 640
<b>Total</b>			<b>130 410</b>	<b>192 150</b>

Tableau 5 : Comparaison du volume excavé lors de la construction des stations du tracé n°3

Le métro sur roulement pneu avec des stations peu profondes nécessite d'extraire un **volume 32 % moins important** que le métro sur roulement fer sur le tracé n°3.

Le bilan carbone associé aux travaux d'excavation lors de la construction des stations aurait un écart du même ordre de grandeur, soit un bilan plus faible d'environ 30 % avec le métro sur roulement pneu par rapport au métro sur roulement fer.

### 3.2. Diminution des émissions de CO<sub>2</sub>.

Ce paragraphe détermine l'économie d'émissions de CO<sub>2</sub> en passant de la voiture au métro automatique sans distinction du système de transport.

Pour cela, les dix trajets-types utilisés pour la comparaison entre le métro sur roulement pneu et le métro sur roulement fer sont repris comme base de travail. Sur ces dix trajets, les différences d'émissions de CO<sub>2</sub> entre le transport par véhicule individuel et par le métro sont comparées en se basant sur les données fournies par la RATP pour les voitures individuelles et par les constructeurs pour les matériels roulants.

Le site de la RATP fournit directement l'émission de CO<sub>2</sub> par trajet pour une voiture.

La consommation équivalente en pétrole pour transporter un passager sur un kilomètre est évaluée à 2,86 gep/pko. Le coefficient de conversion entre gep/pko et kéq-CO<sub>2</sub>/passager/km est de 0,004 kéqCO<sub>2</sub>/gep d'après l'ADEME. Les émissions du métro par passager sur un trajet sont donc égales à la consommation par passager et par kilomètre rapportée à la longueur du trajet.

Le tableau n°6 répertorie les pourcentages de diminution des émissions par passager pour les dix trajets-types.

Etudes des trajets types				
trajet type.	Emission CO2 par voiture (kéqCO <sub>2</sub> )	Parcours mé- tro (km)	Emission par passager pour GPE (kéqCO <sub>2</sub> )	Diminution des émis- sions par passager en pourcentage
1	2,21	13,19	0,15	93 %
2	2,08	12,10	0,14	93 %
3	4,24	14,20	0,23	95 %
4	3,44	18,19	0,32	91 %
5	4,25	33,24	0,38	91 %
6	2,76	15,82	0,18	93 %
7	4,78	39,89	0,46	90 %
8	2,30	12,7	0,15	93 %
9	2,46	11,68	0,13	95 %
10	3,71	20,99	0,24	94 %

Tableau 6 : Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> par passager

Sur l'ensemble des trajets-types, on obtient une **diminution des émissions de CO<sub>2</sub> de 93 %**. Cette moyenne montre bien que, en plus d'être moins consommateur que la voiture, le maillage du réseau permet de garder des trajets optimisés en distance de parcours.

### 3.3. Impact du report modal

L'estimation de la fréquentation du métro automatique en petite couronne est d'un million de voyageurs par jour en 2035 dont **20 % de nouveaux utilisateurs** (Société du Grand Paris). Sur la moyenne couronne, la fréquentation est évaluée à 500 000 voyageurs par jour en 2035 avec toujours 20 % de nouveaux voyageurs.

L'impact du report modal est double :

- En petite couronne, 200 000 personnes ne prendront plus leur voiture pour leurs déplacements quotidiens et 100 000 personnes en moyenne couronne. Le report de la voiture vers le métro permet de **fluidifier le trafic routier** de manière significative.
- Avec une réduction de 93 % d'émission de CO<sub>2</sub> en passant au métro automatique, on réalise une économie de 729 000 téqCO<sub>2</sub>/an. Comparé au 8,5 millions de tonnes par an d'émission pour les véhicules légers en Ile-de-France (*ICE, Plan climat de la région Île-de-France, Livre vert: état des lieux et perspectives en Île-de-France, juillet 2011*) cela équivaut à une **économie de 8,7 %**.

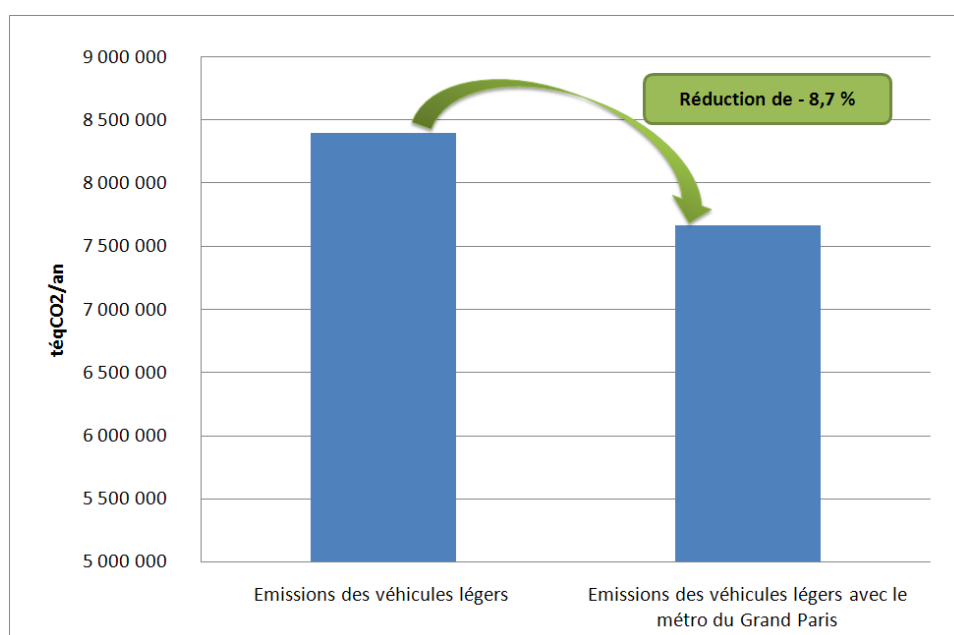


Figure 8 : Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> des véhicules légers en Ile-de-France avec l'intégration du métro du Grand Paris



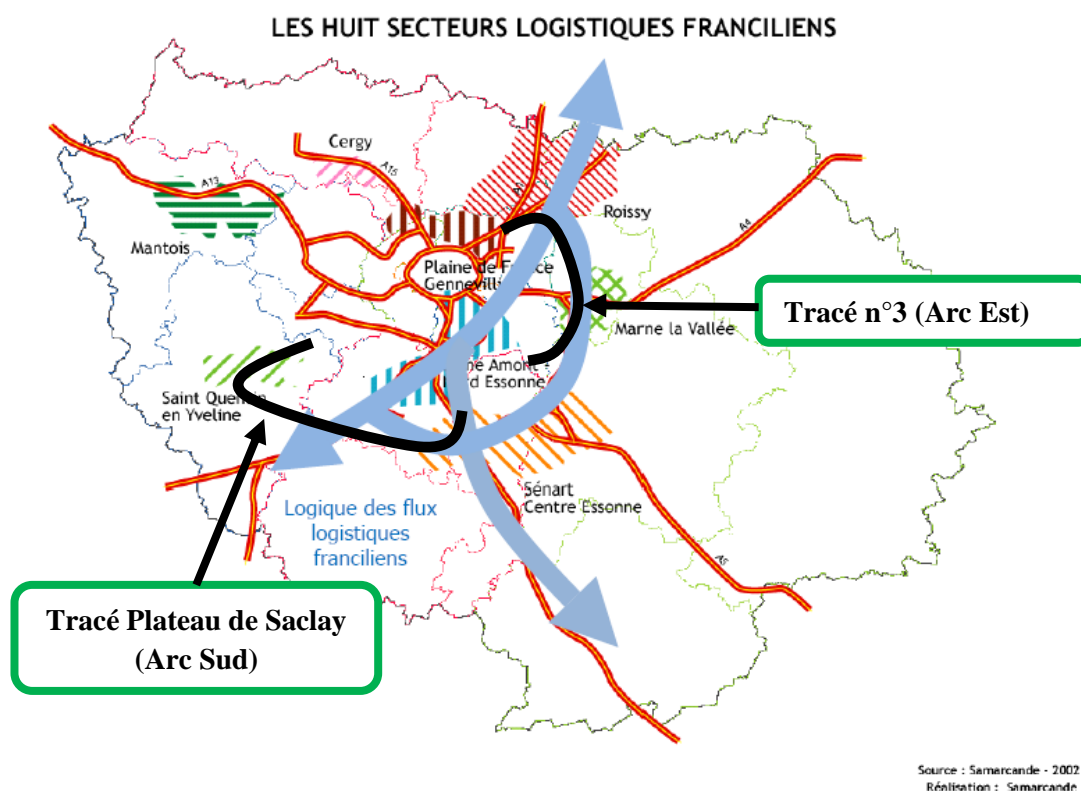
# Chapitre 4 :

## Intégration du fret

## 1. Tracé métro-fret

Le projet de métro du Grand Paris concerne une aire très large au sein de la région Capitale. Cependant, la possibilité de l'intégration du fret dans le réseau dépend des flux de marchandises qui permettent de relier les principales zones logistiques d'Ile-de-France.

Une étude réalisée par la DRIEA (2010) met en perspective un **axe logistique Nord-est – Sud-ouest en moyenne couronne** reliant la Seine-Saint-Denis aux Yvelines via l'ouest de la Seine-et-Marne, le Val-de-Marne et le nord de l'Essonne (carte 11).



*Carte 11 : Axe Nord-est – Sud-ouest des flux de marchandises en Ile-de-France  
(Rapport DRIEA 2010)*

Dans le projet de métro du Grand Paris, deux tracés envisagés pour le futur métro se trouvent sur cet axe logistique :

- La Grande Rocade Est (tracé n°3 dans cette étude) reliant Le Bourget RER à Champigny Le Plant. Ce tracé relie la Seine-Saint-Denis à l'est du Val-de-Marne via l'ouest de la Seine-et-Marne ;
- Le tracé du Plateau de Saclay relie l'ouest du Val-de-Marne aux Yvelines via le nord de l'Essonne.

Ces deux tracés ne sont pas reliés dans le Val-de-Marne. Ce département est pourtant prépondérant pour le flux de marchandises en Ile-de-France. Il concentre l'aéroport d'Orly, le marché de Rungis et le port de Bonneuil (deuxième port fluvial de la région).

Le rapport de Pascal Auzannet (2011), missionné par la DATAR, suggère de relier la gare de Bry-Villiers-Champigny à Orly afin de fusionner l'Arc Est et l'Arc Sud (carte 12).



*Carte 12 : Tracé reliant l'Arc Est à l'Arc Sud (en pointillé) – Rapport Auzannet (2011)*

La SCM propose de mettre en place un tracé complet permettant de répondre aux besoins de transferts de marchandises suivant l'axe Nord-est – Sud-ouest en moyenne couronne.

Ce tracé relie 26 stations (figure 9) pour une longueur totale de 84 km. La distance interstation est en moyenne de 3,4 km, ce qui est cohérent avec la mise en place d'un métro rapide et à capacité adaptée.

La carte 13 présente le tracé envisagé reliant Versailles-Chantiers au Bourget RER.



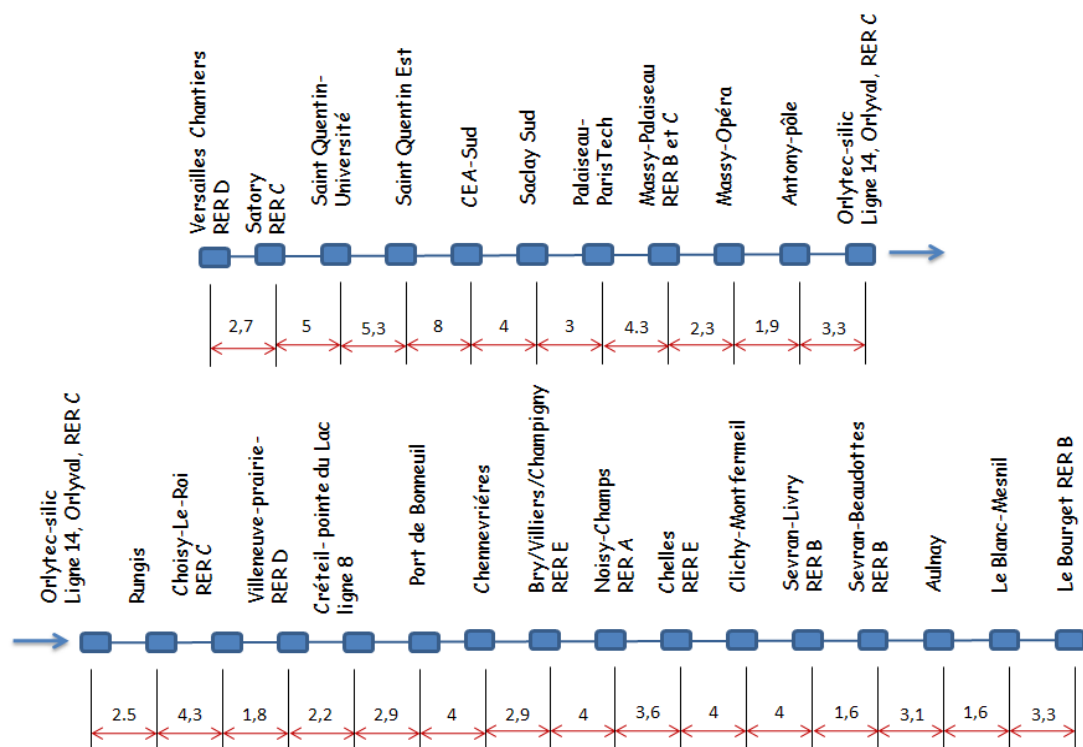
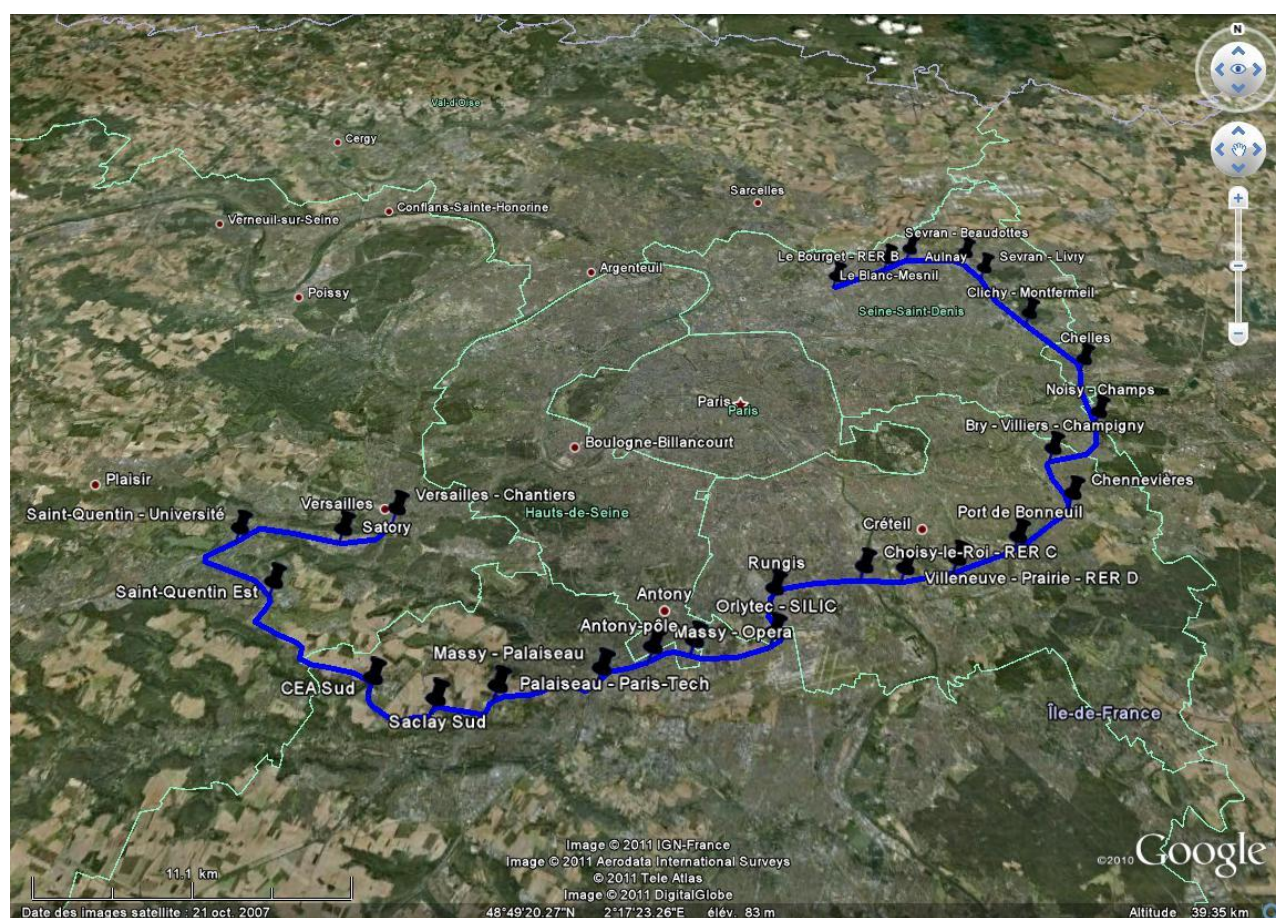


Figure 9 : Les 26 stations du tracé fret



Carte 13 : Tracé fret Nord-est – Sud-ouest reliant Le Bourget RER à Versailles-Chantiers



Tout au long de ce tracé, la mise en place de fret par métro est envisageable pour sept stations représentant sept zones logistiques majeures :

- Station Le Bourget RER : Le Bourget est la seconde gare de triage de wagons de fret d’Ile-de-France. Elle concentre les échanges de fret ferroviaire avec l’Europe du Nord. De plus, la position centrale du Bourget en Seine-Saint-Denis (entre le port de Gennevilliers et l’aéroport de Roissy) lui permettrait de devenir le point de collecte-distribution du petit fret de la banlieue nord de Paris. La station est desservie par l’autoroute A1.
- Station Noisy-Champs : cette station est desservie par l’autoroute A4. Elle peut être un point d’acheminement des marchandises de la Seine-et-Marne.
- Station Port de Bonneuil : Il s’agit du deuxième port d’Ile-de-France, ce qui permet de se connecter au fret fluvial.
- Station Villeneuve-Prairie-RER D : Villeneuve-Saint-Georges est la première gare de triage de wagons de fret en France. Elle concentre les échanges de fret ferroviaire vers le sud.
- Station Rungis : le marché de Rungis est le plus grand marché de produit frais en France. Le type de marchandises échangées est compatible avec du fret métro. La station est desservie par les autoroutes A10 et A6.
- Station de Massy-Palaiseau : la situation de cette station permet d’acheminer les marchandises de l’Essonne et de se connecter au réseau TGV.
- Saint-Quentin-est : la réalisation de ce tracé permet de désenclaver la zone d’activité de Saint-Quentin-en Yvelines, deuxième pôle économique de l’Ouest parisien.

## **2. Exploitation de la ligne métro-fret**

### **2.1. Mode d’exploitation de la ligne**

Le trafic de voyageurs sur ce tracé de moyenne couronne est évalué à 15 000 pphpd en heures de pointe. Ce flux nécessite l’utilisation d’un métro d’une longueur totale de 34 m ayant un départ toutes les 1 min et 10 s.

Pour avoir un coût de construction de la ligne compatible avec le projet de métro du Grand Paris, il est possible d’ajouter un wagon permettant le transport de marchandises. La longueur de chaque station est alors d’environ 45 m.

En heures creuses, le trafic de voyageurs décroît à environ 10 000 pphpd. Il n’est donc plus nécessaire de garder une fréquence maximale : il est possible de remplacer un métro sur trois par un métro de 45 m dédié au fret.

Dans le cadre du projet de métro du Grand Paris, l'exploitation des lignes la nuit est envisagée. Ce tracé peut alors être utilisé comme une infrastructure dédiée au fret, en gardant la même longueur de métro qu'en journée dans un souci d'homogénéité.

## **2.2. Capacité théorique de la ligne métro-fret**

Considérons des wagons fret ayant une charge utile de 9,5 t. Le chargement en bout de ligne des wagons est effectué dans une voie annexe à la station à partir d'un quai équipé pour la manutention, l'approvisionnement et l'évacuation des containers. L'accrochage et le décrochage des wagons sont réalisés pendant l'arrêt du métro en station sans allonger la durée d'arrêt à quai.

L'échange de containers en station se fait en temps masqué dans la continuité de la station sur un quai dédié.

L'intervalle d'exploitation dépend directement de la longueur du métro. Avec des trains de 45 m, cet intervalle est de 71 s.

La journée de dix-huit heures est décomposée en six heures de pointe et douze heures creuses. La charge utile de l'ensemble du métro est de 9,5 t en heures de pointe. Le débit horaire par direction est donc d'environ 480 t/h.

La configuration de métro en heures creuses étant la même qu'en heures de pointe avec une fréquence d'un tiers inférieure, le débit est donc d'un tiers inférieur c'est à dire 320 t/h.

A ceci, il faut ajouter la capacité de transport des trains dédiés circulant en période creuses. Leur charge utile est de 38 t. Il en circule deux fois moins que de métro mixte, le débit horaire est d'environ 640 t/h.

Les trains dédiés de nuit sont de même nature que ceux utilisés en journée mais ils circulent à la fréquence maximale d'un métro toutes les 15 minutes ; leur débit horaire est donc de 152 t/h.

La **capacité théorique** par direction du métro-fret sur 24h est d'environ 15,4 kt/jour, soit **5 600 kt/an**.

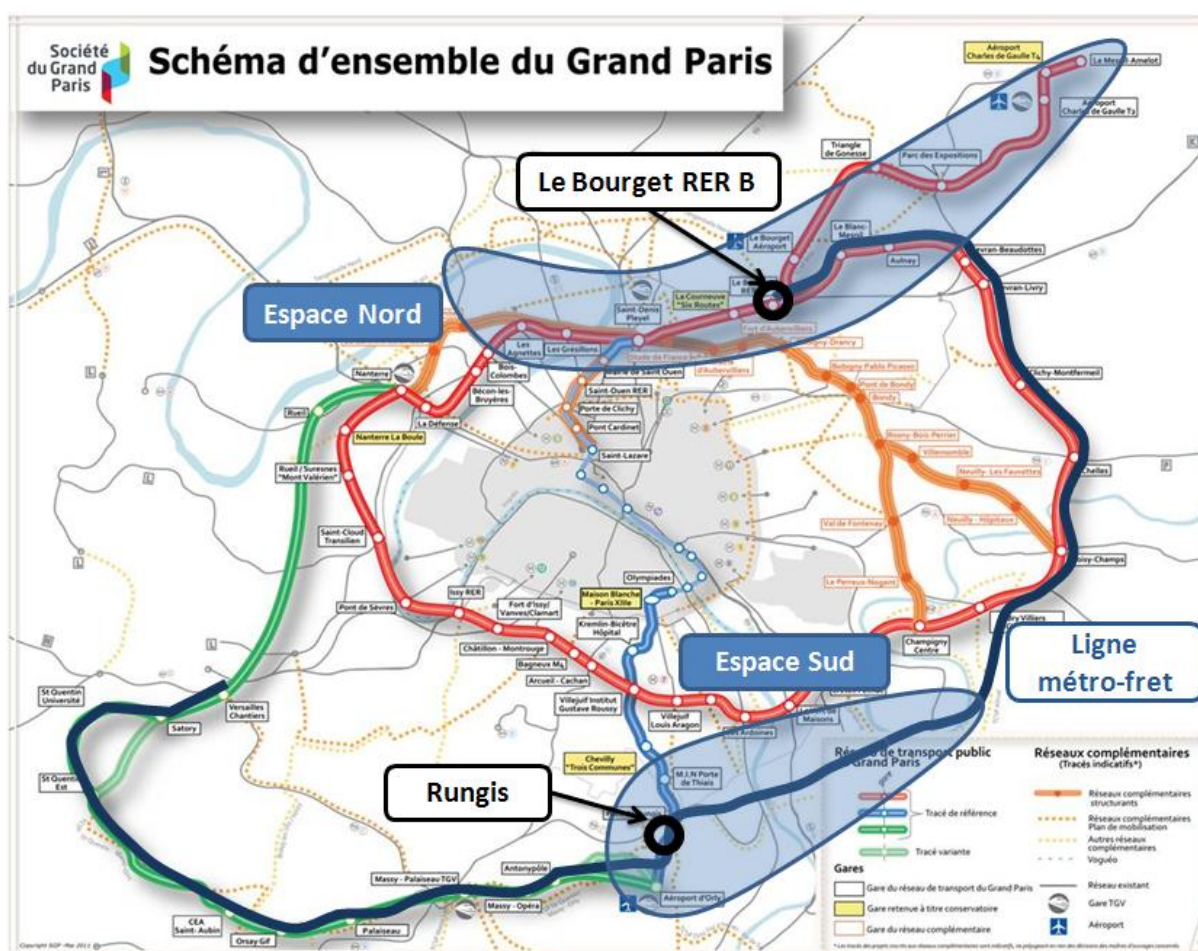
Cette capacité n'est pas réaliste car elle suppose en remplissage à 100% des wagons de fret. Dans le paragraphe suivant, les capacités des transports de fret routier et de métro-fret sont comparées sur un exemple basé sur les échanges réels de marchandises entre les deux principaux espaces logistiques d'Ile-de-France.

### 3. Comparaison transport routier et métro-fret

#### 3.1. Comparaison de la capacité de transport

Pour comparer les capacités de transport entre le transport routier et le métro-fret, nous prenons en exemple les échanges entre les deux zones logistiques principales d'Ile-de-France :

- **l'espace Nord**, entre le port de Gennevilliers et l'aéroport de Roissy, centré sur Le Bourget (Seine-Saint-Denis) : les marchandises, traditionnellement liées à l'industrie, peuvent être acheminées vers le sud à partir de la station Le Bourget RER ;
- **l'espace Sud**, entre le port de Bonneuil et l'aéroport d'Orly, centré sur le marché de Rungis (Val-de-Marne) : les marchandises, principalement liées à la grande distribution et aux produits alimentaires, peuvent être acheminées vers le nord à partir de la station Rungis.



Carte 14 : Espaces logistiques Nord et Sud reliés par la ligne de métro-fret

### 3.1.1 *Flux de marchandises entre la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne*

Une étude de la Direction Régionale de l'Équipement d'Ile-de-France a permis de recenser les volumes de marchandises échangés par transport routier entre les différents départements d'Ile-de-France en 2003. Le flux entre la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne est comparé à la capacité du métro-fret dans le sens Le Bourget – Rungis. Le flux entre le Val-de-Marne et la Seine-Saint-Denis est comparé au flux de capacité équivalent dans le sens Rungis – Le Bourget.

Tous les transports de marchandises ne sont pas adaptés au métro-fret. Dans cette comparaison, ne sont retenus que les produits alimentaires et manufacturés ainsi que la messagerie, ce qui correspond à environ 35 % du total des marchandises échangées.

Les flux par transport routier des marchandises adaptées au métro-fret sont les suivants :

- flux de marchandises du 93 vers le 94 : **262 kt/an** ;
- flux de marchandises du 94 vers le 93 : **490 kt/an**.

La capacité théorique par direction de la ligne métro-fret est d'environ 5 600 kt/an. La ligne de métro-fret peut donc très largement remplacer le fret routier. En effet, le **métro-fret** est théoriquement capable d'acheminer **20 fois le flux routier allant du 93 au 94** et **10 fois le flux allant du 94 au 93**.

En prenant une charge utile d'environ 19 t par camion, **le nombre de camions retirés** du parc routier en Ile-de-France est d'environ **14 000 camions par an** dans le sens **Le Bourget – Rungis**, et **26 000 par an** dans le sens **Rungis – Le Bourget**.

### 3.1.2 *Dimensionnement par rapport aux flux et aux contraintes techniques*

Pour reporter le flux de marchandises du réseau routier sur le réseau métro, le métro-fret doit être capable d'acheminer au moins 490 kt/an. Il s'agit de la direction dans laquelle le flux est le plus important : de Rungis vers Le Bourget.

La capacité de la ligne de métro-fret étant très importante, il n'est pas nécessaire de mettre en place un service 24h/24. Nous proposons un mode d'exploitation du fret pour répondre à la demande actuelle de transport de marchandises.

La ligne de métro-fret est mise en **exploitation uniquement** pendant les dix-huit heures de **la journée**. En considérant les contraintes logistiques et les contraintes techniques du remplissage des métros durant le temps d'arrêt en station, la charge utile réelle peut être estimée à 15% de la charge utile théorique pour les métros mixtes. Ainsi on considère qu'un wagon chargé en bout de ligne peut **distribuer la marchandise** sur

les 25 autres stations ou à l'inverse **collecter de la marchandise** sur chacune des stations.

Dans ces conditions, il suffit d'introduire un seul train complet dédié au fret toutes les heures creuses pour obtenir une capacité par direction d'environ 540 kt/an. Ces fréquences de départ sont compatibles avec le temps de remplissage en bout de ligne des wagons.

Le dimensionnement de la ligne de métro-fret est le suivant :

- pendant les six heures de pointe : un **métro mixte toutes les 71 s** avec une charge utile moyennée de 1,425 t ;
- pendant les douze heures creuses :
  - un **métro mixte toutes les 107 s** avec une charge utile moyennée de 1,425 t ;
  - un **métro dédié par heure** avec une charge utile de 38 t.

### 3.2. Comparaison des temps de trajets

Ce paragraphe met en relief le gain de temps généré par l'utilisation du métro-fret. L'étude porte sur les six trajets entre Le Bourget RER et les six autres zones logistiques que sont :

- Noisy-champs ;
- Le Port de Bonneuil ;
- Villeneuve-Saint-Georges ;
- Rungis ;
- Massy-Palaiseau ;
- Saint-Quentin-Est.

Les données concernant les trajets par la route ont été obtenues à partir des itinéraires Mappy pour des poids lourds supérieurs à 12 t.

Considérant que ces itinéraires sont calculés avec un trafic fluide, il est nécessaire de calculer les temps de parcours en heure de pointe. La vitesse de circulation sur route étant d'environ un tiers plus faible en période de fort trafic (figure 10), il en résulte que le temps de parcours est d'un tiers plus long.



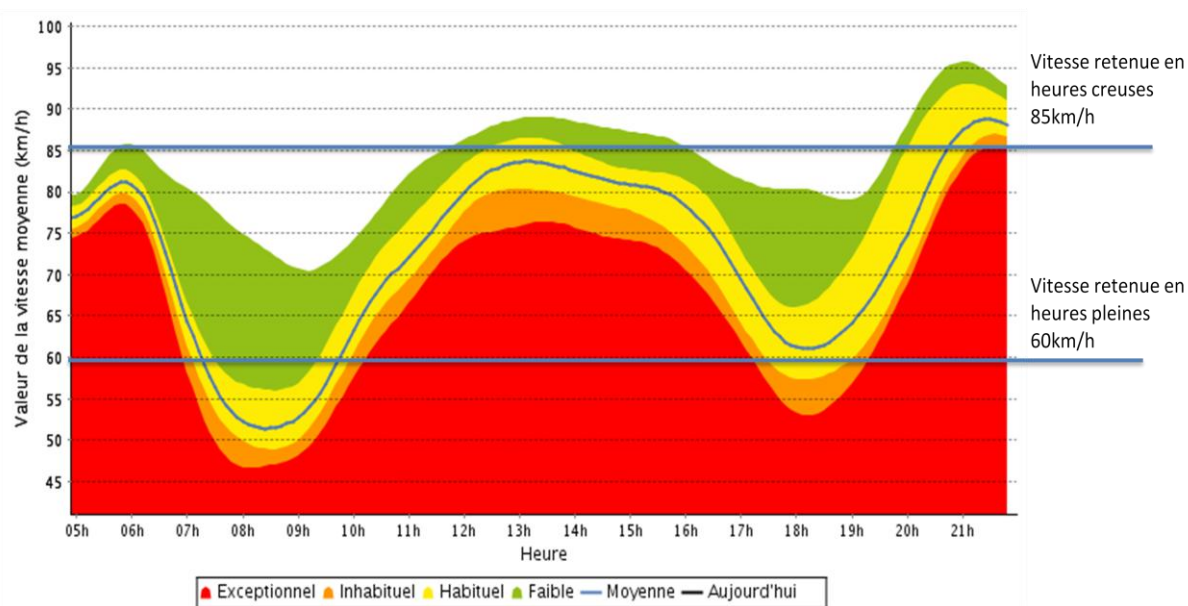


Figure 10 : Vitesse moyenne des véhicules en Ile-de-France  
Direction Interdépartementale des Routes d'Ile-de-France

Concernant le métro-fret, les temps de parcours ont été calculés à partir de la distance interstation et de la vitesse commerciale. La vitesse commerciale est évaluée de la même manière qu'au chapitre 3 : pour la ligne de métro-fret, elle est de 68 km/h.

Les gains de temps obtenus entre Le Bourget RER et les six autres zones logistiques sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

	Trajets depuis Le Bourget (min)			Pourcentage de temps gagné avec le métro-fret	
	routier HC	routier HP	Métro Grand Paris	Heures creuses	Heures de pointe
Noisy-champs	31	40,30	24,71	32 %	47 %
Port de Bonneuil	27	33,75	23,82	12 %	29 %
Villeneuve St-George	37	46,25	26,47	28 %	43 %
Rungis	41	51,25	30,00	27 %	41 %
Massy-palaiseau	51	63,75	34,41	33 %	46 %
Saint-Quentin-Est	50	62,50	40,59	19 %	35 %

Tableau 7 : Gain de temps entre les zones logistiques avec le métro-fret

A partir de la station Le Bourget, le transport en **métro-fret** est en moyenne **23% plus rapide** que le transport routier en heures creuses et **41% plus rapide** en heures de pointe.

### 3.3. Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub>

Le calcul de la consommation du métro-fret est effectué en rapportant la consommation par passager sur un kilomètre de 2,86 gep/pko au poids d'un passager évalué à 70 kg. La consommation par tonne et par kilomètre est donc de 40,86 gep/t/km.

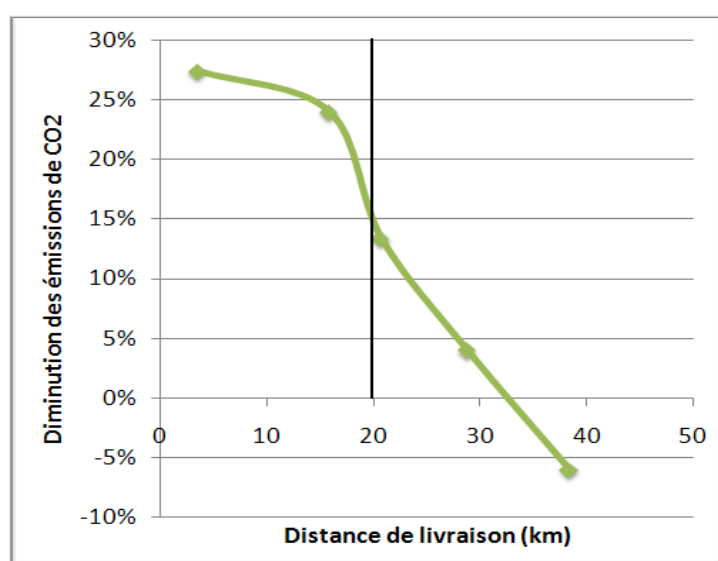
Les émissions du transport routier ont été calculées avec les données de la commission européenne, on obtient une consommation de 42 gep/t/km.

La réduction est donc de **2,8 % par tonne et par kilomètre**. Pour une distance identique, la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> est donc relativement faible. Cependant, pour évaluer la diminution réelle, il est nécessaire de comparer les émissions en prenant en compte les distances réellement parcourues entre les points de collecte et de distribution.

Le tableau ci-dessous répertorie les diminutions de CO<sub>2</sub> par rapport au transport routier en fonction de la distance parcourue sur la ligne de métro-fret pour des livraisons au départ du Bourget RER.

Livraison	Distance entre deux livraisons (km)	Diminution des émissions de CO <sub>2</sub> par rapport au transport routier
Toutes les stations	3,4	27,4%
Toutes les zones logistiques	15,8	24%
Toutes les 2 zones logistiques	20,6	13,4%
Toutes les 3 zones logistiques	28,7	4%
Toutes les 4 zones logistiques	38,3	-6%

*Tableau 8 : Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> pour des livraisons au départ du Bourget RER par rapport au transport routier*



*Figure 11 : Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> en fonction de la distance parcourue par rapport au transport routier pour des livraisons au départ du Bourget RER*

Pour des livraisons allant jusqu'à 20 km, la diminution des émissions de CO<sub>2</sub> est **supérieure à 15 %** par rapport au transport routier. Le métro-fret est donc très efficace pour des livraisons de type collecte-distribution sur de courtes distances. En effet, pour ce type de transport, la ligne de métro permet d'effectuer des parcours beaucoup plus courts que par la route.

En revanche, le tracé globalement circulaire de la ligne métro-fret en moyenne couronne augmente les distances par rapport à la route lorsque les livraisons sont trop espacées. Au-delà de 32 km, les émissions de CO<sub>2</sub> sont mêmes inférieures pour le transport routier.

L'intégration du métro-fret au sein du projet de métro du Grand Paris est donc plus adaptée à des **livraisons de type collecte-distribution sur de courtes distances** qu'à des livraisons point à point effectuées sur de longues distances.

# Références

### Liste de sites web consultés :

- <http://www.metrograndparis.com/>
- <http://www.arcexpress.fr/>
- <http://www.orbival.fr/>
- <http://www.debatpublic-arcexpress.org/docs/etudes/Etudes-enjeux-transports-etudes-traffic-stif/cahier1.pdf>
- [http://www.iau-idf.fr/fileadmin/Etudes/etude\\_763/Arc\\_Express.pdf](http://www.iau-idf.fr/fileadmin/Etudes/etude_763/Arc_Express.pdf)
- <http://www.cg94.fr/transport-voirie/15731-les-specificites-du-val-de-marne-pour-le-fret.html>
- <http://www.dolceta.eu/france/Mod5/Efficacite-energetique-des.html>
- [http://www.sytadin.fr/opencms/sites/sytadin/sys/courbes/courbe\\_vitesse.jsp.html](http://www.sytadin.fr/opencms/sites/sytadin/sys/courbes/courbe_vitesse.jsp.html)
- <http://maps.google.com/>
- <http://www.ratp.fr/itineraires/>
- <http://www.stif.info/les-transports-aujourd-hui/les-programmes-amelioration-qualite-service/les-indicateurs-qualite/bilan-2009-indicateurs-qualite-service-3624.html>
- [http://www.stif.info/IMG/pdf/ChiffresQualite\\_OCTOBRE\\_2010.pdf](http://www.stif.info/IMG/pdf/ChiffresQualite_OCTOBRE_2010.pdf)
- [http://www.stif.info/IMG/pdf/CP\\_ligne\\_13\\_nov\\_07.pdf](http://www.stif.info/IMG/pdf/CP_ligne_13_nov_07.pdf)

### Liste des documents consultés :

- *Le dossier du maître d'ouvrage, Le réseau de transport public du Grand Paris*, Société du Grand Paris ;
- *Etude de benchmarking pour le projet de fret dans le cadre de la préparation du débat public sur le Grand Paris*, Direction Régional de l'équipement et de l'aménagement d'Ile-de-France ;
- *Le fret en Ile-de-France, Annuaire statistique 2003*, Direction Régional de l'équipement et de l'aménagement d'Ile-de-France ;
- *Livre vert : état des lieux et perspectives en Île-de-France*, ICE, Plan climat de la région Île-de-France, juillet 2010 ;
- *ARC EXPRESS/Grand Paris, Débats publics sur les projets de rocade, Pour une double boucle à l'Est*, ACTEP, décembre 2010.





Société de Calcul Mathématique SA  
111 Faubourg Saint Honoré, 75008 Paris  
tel 01 42 89 10 89, fax 01 42 89 10 69  
scm.sa@orange.fr ; [www.scmsa.eu](http://www.scmsa.eu)