

Arc Express

débat public sur le métro de rocade

DOSSIER DES ÉTUDES

Étude

Systemes de transport

(SETEC TPI / XELIS)





AVERTISSEMENT

Les études préalables, dont fait partie le document qui suit, ont été réalisées en 2008-2009 afin d'élaborer le Dossier d'Objectifs et de Caractéristiques Principales présenté au Conseil du STIF en juillet 2009 et qui a servi d'appui à la constitution du dossier de saisine de la Commission nationale du débat-public.

Ces études avaient pour objet premier de valider la faisabilité du projet Arc Express.

Réalisées par différents prestataires du STIF, elles ne portent pas nécessairement la position retenue in fine par le STIF dans le dossier du maître d'ouvrage élaboré pour le débat public, ce dossier étant aussi le fruit d'une maturation des sujets au sein des équipes du STIF, éclairée par ces études mais également le fruit d'échanges avec les partenaires du projet.

Dans ces études préalables, plusieurs éléments ont pu être retenus comme des postulats permettant un chiffrage du projet ou servant de base aux études de trafic. Il en va par exemple du positionnement des stations intermédiaires évoqué dans certains rapports.

Ces choix a priori n'avaient qu'une visée méthodologique. Seules les étapes de concertation à venir permettront de définir les caractéristiques et les tracés précis du projet Arc Express.

Si le STIF décide de poursuivre le projet à l'issue du débat public, de nouvelles études approfondies seront menées en vue de l'enquête publique, puis lors de l'élaboration de l'avant-projet détaillé.

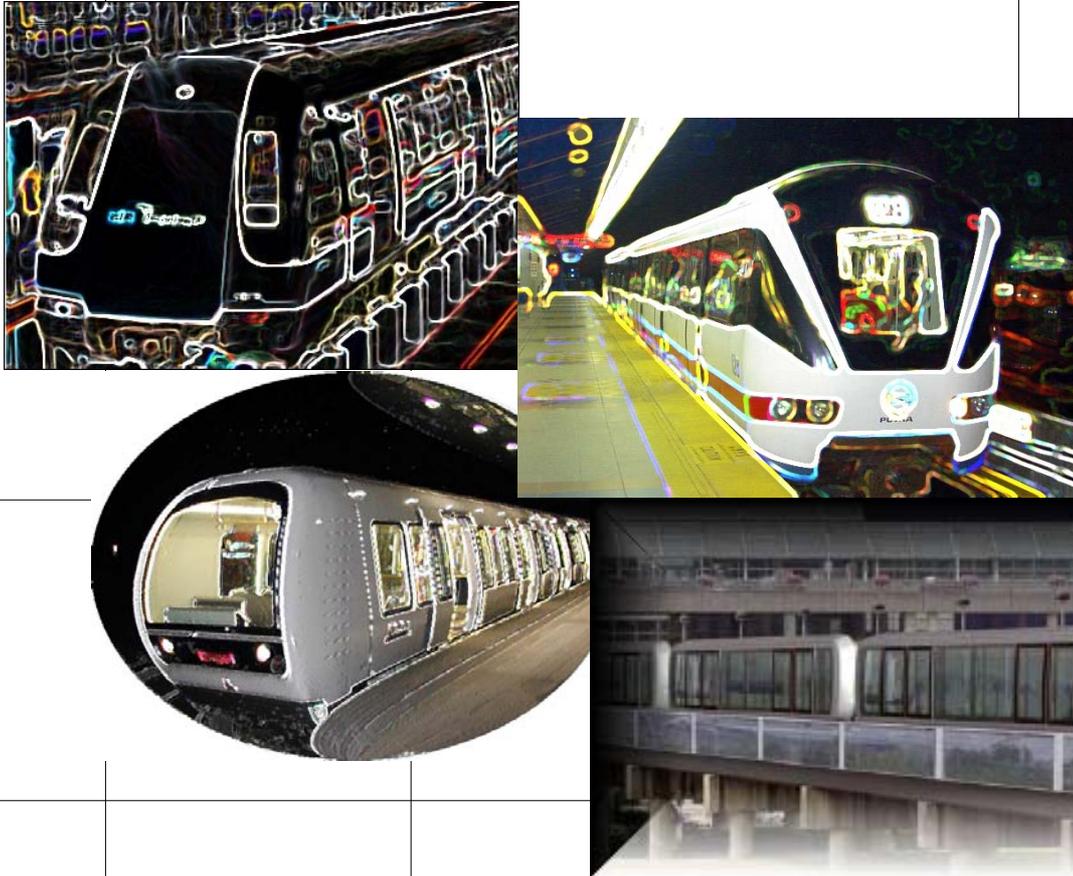
Contenu du dossier des études :

- >> Perspectives de croissance urbaine (IAU) ;
- >> Etudes des enjeux transports et études de trafic (STIF) ;
- >> Etude des points de maillage potentiels (RATP) ;
- >> Etudes des pôles d'échanges SNCF/ Arc Express (SNCF) ;
- >> Etude d'une solution de système de transport en synergie technique avec les réseaux ferrés RATP (RATP) ;
- >> Etudes de systèmes de transport (SETEC TPI / XELIS) ;
- >> Etudes d'insertion de tracés, d'impact sommaire et rédaction du DOCP (SETEC TPI / XELIS / INGEROP) ;
- >> Synthèse et extraits du rapport études exploratoires des modalités de financement du projet Arc Express liées aux retombées économiques du projet s'agissant des aspects « montages contractuels » et « financement du projet » (DS Avocats / SP2000 / Paul Hastings / KPMG / Atis Real / Arcadis) ;

Maitre d'Ouvrage

Stif

11 Avenue de Villars
75007 Paris



Rapport Phase 1

Typologie des systèmes existants, en service ou en développement

Bureau d'étude mandataire

setec tpi

Tour Gamma D
58, quai de la Rapée
75583 Paris cedex 12
Tél. : 01.40.04.59.25
Télécopie : 01.40.04.59.20
Email : tpi@tpi.setec.fr

Bureau d'étude co-traitant

xelis

Bâtiment Hautacam H1
12 Avenue du Val de Fontenay
94120 Fontenay-sous-Bois
Tél. : 01.58.77.08.65
Télécopie : 01.58.77.18.94
Email : martine.tocquer@xelis.fr

Echelle (s) :
Sans objet

Date :
02.10.2008

Référence :

Indices :

Société :

Affaire

Emet. :

Type :

Phase :

Numéro :

Dif. :

Rev. :

003

23815

S

T

004

A

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
1. INVENTAIRE.....	4
1.1 MÉTROS ET TRAMWAYS.....	4
1.2 MONORAILS	7
1.3 EXEMPLES DE SYSTÈMES DE TRANSPORT URBAIN AUTOMATIQUES	8
1.3.1 Vancouver	9
1.3.2 Singapour.....	10
1.3.3 Copenhague.....	12
1.3.4 Dubaï	13
1.3.5 Barcelone	15
1.3.6 Taipei.....	16
1.3.7 Toulouse	17
1.4 PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS ET PRINCIPAUX PRODUITS	18
1.5 TYPOLOGIE.....	20
1.5.1 Réserve de capacité.....	20
1.5.2 Caractéristiques de développement.....	21
1.5.3 Dimensions des véhicules	22
1.5.4 Conclusions.....	23
2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES	24
2.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA LIGNE ET DE L'EXPLOITATION	24
2.2 CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL ROULANT	24
2.3 CARACTÉRISTIQUES DES AUTOMATISMES	24
2.4 CARACTÉRISTIQUES DES INFRASTRUCTURES	28
2.4.1 Infrastructures en section courante	28
2.4.1.1 Tracés en plan et en profil	28
2.4.1.2 Dimensions intérieures des ouvrages.....	30
2.4.2 Stations	32
2.4.3 Garage / atelier	34
3. COÛTS, DÉLAIS ET RISQUES	35
3.1 COÛTS DE CONSTRUCTION	35
3.2 COÛTS D'EXPLOITATION	37
3.3 RISQUES ÉVENTUELS	38

4.	DÉFINITION DE SYSTÈMES CIBLES	40
4.1	OBJECTIF	40
4.2	APPROCHE PROPOSÉE	40
4.2.1	<i>Définition</i>	40
4.2.2	<i>Données d'entrée</i>	41
4.2.3	<i>Méthodologie</i>	42
4.3	ENTRETIEN AVEC LES INDUSTRIELS	44

INTRODUCTION

Ce document constitue le rapport de la phase 1 de l'étude « Arc express – Études de systèmes de transport » réalisée par SETEC TPI - XELIS pour le compte du Syndicat des Transports d'Île-de-France.

Ce rapport traite de la typologie des systèmes de transport urbains existants, en service ou en développement conformément aux Cahier des Clauses Techniques Particulières.

Il comporte :

- Un inventaire des systèmes de transport urbains automatiques dans le monde ainsi qu'une analyse plus détaillée de certains de ces systèmes qui permettent d'illustrer les facteurs clés du développement et de la typologie de tels systèmes ;
- Un inventaire des principaux constructeurs et produits intervenant dans la sphère des métros automatiques ;
- Une analyse typologique des métros automatiques qui porte essentiellement sur les éléments de réserve de capacité, les caractéristiques de développement et les dimensions de véhicules ;
- Une description générale illustrée d'exemples des caractéristiques techniques des métros automatiques : ligne et exploitation, matériel roulant, automatismes et infrastructures ;
- Des éléments concernant les coûts, délais et risques relatifs à la construction d'un système tel qu'Arc Express ;
- Une proposition d'approche méthodologique pour la définition des systèmes cibles qui serviront de base au travail de la phase 2 ;
- Une liste des informations à recueillir lors des entretiens avec les industriels.

1. INVENTAIRE

L'inventaire des systèmes de transport a été élaboré à l'échelle mondiale et sur la base des critères suivants :

- Lignes de TCSP entièrement automatique, c'est-à-dire sans conducteur (la présence d'agents à bord des véhicules n'est pas un facteur d'élimination) ;
- Systèmes en exploitation ou dont la mise en service interviendra au plus tard en 2012 ;
- Classification par pays, par ville puis par ligne ;
- Prise en compte des lignes de desserte « interne » d'aéroports seulement si elle présente un intérêt : taille, technologies, conception, exploitation, interface avec le réseau TC existant, etc.

Ces critères ont conduit à identifier près de 50 lignes (722 Km au total) de TCSP entièrement automatiques dont 16 en construction (306 Km - ouverture de 2008 à 2012). Ces lignes sont situées dans 18 pays comme suit :

Allemagne (1), Brésil (1), Canada (3), Corée du Sud (4), Danemark (1), Dubaï (2), Espagne (1), France (9), Hongrie (1), Italie (2), Japon (5), Malaisie (1), Royaume-Uni (1), Singapour (7), Suisse (1), Taiwan (2), Turquie (1), USA (4).

Ces lignes font parties des réseaux de transport public urbain de 32 agglomérations dont la taille varie de quelques centaines de milliers d'habitants à plusieurs millions. Cinq de ces lignes assurent la desserte « interne » d'aéroports : de 4 à 7 Km de long, elles sont toutes en interface avec le réseau TC existant.

Les principales caractéristiques de ces lignes ont été regroupées dans un tableau (voir pages suivantes) qui détaille :

- la localisation géographique,
- l'opérateur,
- la longueur,
- le nombre de stations,
- la nature de l'interface voie-quai,
- la date de mise en service,
- les caractéristiques des systèmes et du matériel roulant (constructeur, modèle, configuration, dimensions, roulement, alimentation),
- la capacité des véhicules et de la ligne.

1.1 MÉTROS ET TRAMWAYS

S'agissant de TCSP entièrement automatiques tels que définis ci-dessus, le terme de « métro automatique » est le plus communément utilisé. En particulier, il n'existe pas de système qualifié de « tramway automatique ». Le terme « tramway » étant en général réservé à un système qui a la capacité de circuler à la fois en site propre « fermé » et en site banalisé en se mêlant au trafic automobile moyennant le plus souvent un minimum de protection (site propre « ouvert »).

Tableau inventaire détaillé 1/2

Tableau inventaire détaillé 2/2



Le Docklands Light Railway (Londres) est le seul système dont le matériel roulant d'origine (1987) était dérivé d'un tramway. Ces premiers véhicules ont d'ailleurs été rachetés et reconfigurés par le réseau de tramway d'Essen (Allemagne).

De plus, les véhicules d'un tramway traditionnel comporte peu d'équipements embarqués de type assistance à la conduite ou assistance à l'exploitation (ATO et ATC – voir plus loin pour une explication de ces termes), essentiellement limités aux systèmes de localisation et d'aide à l'exploitation. Ceci justifie d'ailleurs l'appellation de « métro léger » (« light rail » en anglais) souvent appliquée aux tramways.



Les métros automatiques récents, comme ici ceux la ligne Kelana Jaya (Kuala Lumpur) ou Ørestad (Copenhague), sont pour la plupart conçus et dimensionnés pour le transport de masse. Il en est de même pour les systèmes en développement comme le CityVal ci-dessous.

De part leurs véhicules et leurs équipements embarqués et au sol, les métros automatiques entrent de fait dans la catégorie des modes de transport urbains plus « lourds ». Nous convenons donc pour la suite de ce document d'employer le terme métro automatique pour désigner un système de transport en site propre fermé dont les véhicules circulent sans conducteur.



1.2 MONORAILS



Le monorail de Moscou assure une desserte urbaine sur 4,7 Km et 6 stations entièrement en viaduc. Il a une capacité d'environ 6 000 voy./h.

Le cas du monorail a également été examiné dans le cadre de cette étude. A l'échelle mondiale, les monorails se répartissent en 48 lignes (dont 3 en construction) dans 15 pays :

Allemagne (5), Australie (3), Canada (1), Chine (3), Corée du Sud (2), Danemark (1), Dubaï (2), Espagne (1), Émirats Arabes Unis (1), Indonésie (1), Italie (1), Japon (11), Malaisie (2), Royaume-Uni (3), Russie (1), Singapour (2), Thaïlande (1), USA (10).

Le plus ancien d'entre eux a été mis en service en 1901. 22 des 48 lignes assurent une desserte urbaine et 4 de ces lignes urbaines sont entièrement automatiques.

Il faut toutefois souligner les points suivants concernant les monorails :

- Ils présentent un intérêt en termes de coût dans la mesure où l'insertion peut se faire pour l'essentiel en viaduc ;
- Ils sont en général assez peu capacitaires et, pour ceux qui le sont, l'infrastructure se révèle au final assez « encombrante » (exemple du monorail de Kitakyushu au Japon ci-contre – environ 12 000 voy./h) ;
- Il pose des problèmes particuliers en matière d'évacuation, car celle-ci doit se faire, en voie courante, par les extrémités du train (de plus les monorails existants ne possèdent pas toujours de cheminement) ;
- Aucun monorail n'est actuellement exploité en France.



1.3 EXEMPLES DE SYSTÈMES DE TRANSPORT URBAIN AUTOMATIQUES

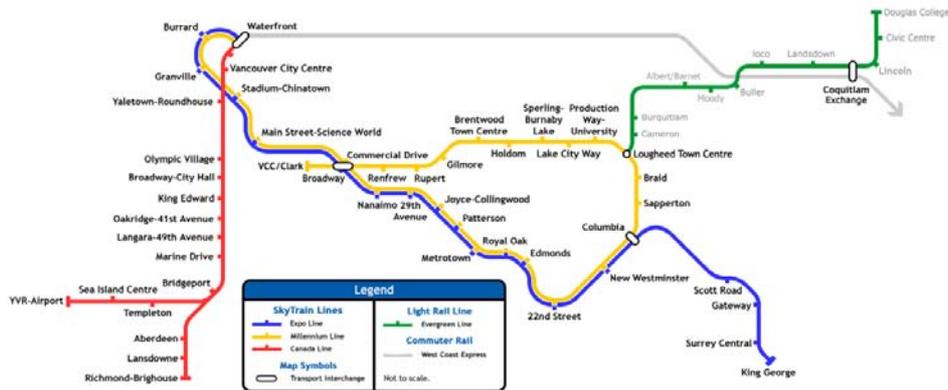
Le parti a été pris de recentrer la présentation de cet inventaire sur un nombre limité d'exemples qui permettent d'illustrer certaines caractéristiques des métros automatiques ; en premier lieu leur diversité technologique et leurs évolutions.

A cet effet, les villes suivantes ont été retenues et ont fait l'objet d'une étude plus détaillée :

- Vancouver,
- Singapour,
- Copenhague,
- Dubaï,
- Barcelone,
- Taipei,
- Toulouse.

1.3.1 Vancouver

Située sur la côte ouest du Canada, l'agglomération de Vancouver est la principale métropole de la Colombie Britannique. Elle couvre une superficie de 3 000 Km² et compte 2 200 000 d'habitants. La ville accueillera les Jeux Olympiques d'hiver de 2010.



Matériel BOMBARDIER MK II

Expo Line & Millenium Line

- Roulement fer
- 2,65 m x 35 m – 2 voitures – Intercirculation
- Induction linéaire
- Automatismes THALES SelTrac
- 10 500 voy./h (max. 21 000 voy./h)

Vancouver possède un système de métro automatique depuis 1985. L'Expo Line, mise en service à cette date, fut la quatrième ligne de métro automatique au monde (après Kobe et Osaka au Japon en 1981 et Lille en France en 1983) et la première sur roulement fer. Il s'agissait également de la première application (en parallèle avec la Scarborough Line de Toronto) de la traction par induction linéaire.

2 lignes de métros automatiques sont aujourd'hui en exploitation : Expo Line et Millenium Line (mise en service en 2002). Au total, 49 Km et 33 stations essentiellement en viaduc ou à niveau. Sur ces deux lignes circulent du matériel BOMBARDIER équipé d'automatismes SelTrac (initialement développés par ALCATEL –aujourd'hui détenu par le Groupe THALES).

Une troisième ligne, la Canada Line, est en construction. Elle couvrira 19 Km, dont 9 Km en souterrain, et comprendra 16 stations. Elle desservira en particulier l'aéroport international. Sa mise en Service est prévue en 2009.

Ce n'est pas le matériel et le système « propriétaire » utilisés sur les deux lignes existantes (BOMBARDIER ART à induction linéaire) qui vont équiper la nouvelle Canada Line. Il s'agira également d'un matériel entièrement automatique, mais utilisant un mode de traction traditionnel.

Ce fait est largement dû aux dispositions introduites dans l'appel d'offre pour mettre les concurrents à égalité. La procédure relative au Partenariat-Public-Privé stipulait en effet que Bombardier ne pouvait s'appuyer sur des synergies d'ordre opérationnel (utilisation d'ateliers ou d'équipements existants par exemple) ou industriel (groupement de commandes de matériel pour la nouvelle ligne avec celles relatives aux lignes existantes) pour élaborer une offre plus avantageuse.



Matériel ROTEM XG EMU

Canada Line

- Roulement fer
- 3,00 m x 41 m – 2 voitures – Intercirculation
- Traction classique
- Automatismes THALES SelTrac
- 6 800 voy./h (max. 13 600 voy./h)

Les caractéristiques technologiques ainsi que la longueur des stations ont en fait été laissées au choix des différents consortiums en lice. Seuls étaient spécifiés la capacité à terme (15 000 voy./h) et le temps de trajet maximum entre le centre ville et l'aéroport (24 minutes).

Une quatrième ligne, la Evergreen Line, est en projet (2014) qui couvrira 11 Km et comprendra 11 stations.

1.3.2 Singapour

Pays d'Asie du Sud-est, Singapour est également une métropole couvrant une superficie de 700 Km² et comptant 4 600 000 d'habitants. Le réseau de transport public existant comprend 6 lignes de métro sur 140 Km. La carte ci-dessous illustre à la fois le réseau actuel et les lignes en construction et en projet (lignes jaune et bleu). Les lignes désignées comme LRT (pour Light Rapid Transit) correspondent au concept de « People Mover » (voir ci-après).





Matériel ALSTOM Métropolis

Northeast, Circle & Downtown Line

- Roulement fer
- 3,20m x 70 m/138 m – 3 ou 6 voitures – Intercirculation
- Automatismes ALSTOM Urbalis
- 13 800 voy./h (max. 27 600 voy./h) ou 27 600 voy./h (max. 55 200 voy./h)

La première ligne de métro automatique lourd, la Northeast Line (20 Km et 16 stations), a été mise en service en 2003. Il s'agit d'une infrastructure entièrement souterraine exploitée avec du matériel ALSTOM très capacitaire.

C'est le même matériel qui équipera les deux lignes en construction.

Singapour possède un système de métro automatique depuis 1999, date à laquelle une première ligne dite LRT (Bukit-Panjang) a été mise en service. 4 lignes automatiques sont aujourd'hui en exploitation, soit 49 Km et 59 stations.

2 lignes supplémentaires sont en construction, soit 38 Km et 35 stations entièrement en souterrain. Leur mise en service est prévue sur la période 2009-2013. Des extensions sont également en projet pour le long terme qui porteront la longueur totale du réseau de métro à 170 Km dont plus de 80 Km de métro automatique.



Matériel BOMBARDIER CX 100

Bukit Panjang LRT

- Roulement pneu
- 2,80 m x 12,80 m – 1 voiture
- Automatismes Westinghouse
- 3 200 voy./h (max. 6 300 voy./h).

Les 3 lignes dites LRT (29 Km et 42 stations) sont entièrement en viaduc ou à niveau. Il s'agit essentiellement de lignes de rabattement sur le métro lourd qui desservent les développements urbains périphériques. Elles utilisent des véhicules plus petits et plus légers et s'apparentent à la catégorie appelée « People Mover » (littéralement « bouge-personne » - transport automatique peu capacitaire sur des infrastructures légères destinés à des déplacements courts).

Ces lignes sont exploitées avec du matériel BOMBARDIER et MITSUBISHI.



Matériel MITSUBISHI Crystal Mover

**Punggol & Shenkang LRT
 (+desserte interne aéroport Changi)**

- Roulement pneu
- 2,69 m x 11,84 m – 1 voiture
- Automatismes Nippon Signal
- 1 800 voy./h (max. 6 300 voy./h)

Le matériel MITSUBISHI Crystal Mover est également exploité sur le « Changi Airport Skytrain » (desserte interne de l'aéroport) avec des rames de 2 à 3 voitures. Initialement exploité avec des véhicules Bombardier CX-100 lors de son ouverture en 1990, les véhicules et les automatismes ont été entièrement remplacés en 2006.

1.3.3 Copenhague



L'aire métropolitaine de la capitale du Danemark, le Grand Copenhague, couvre une superficie de 2 673 Km² et compte 1 840 000 habitants.

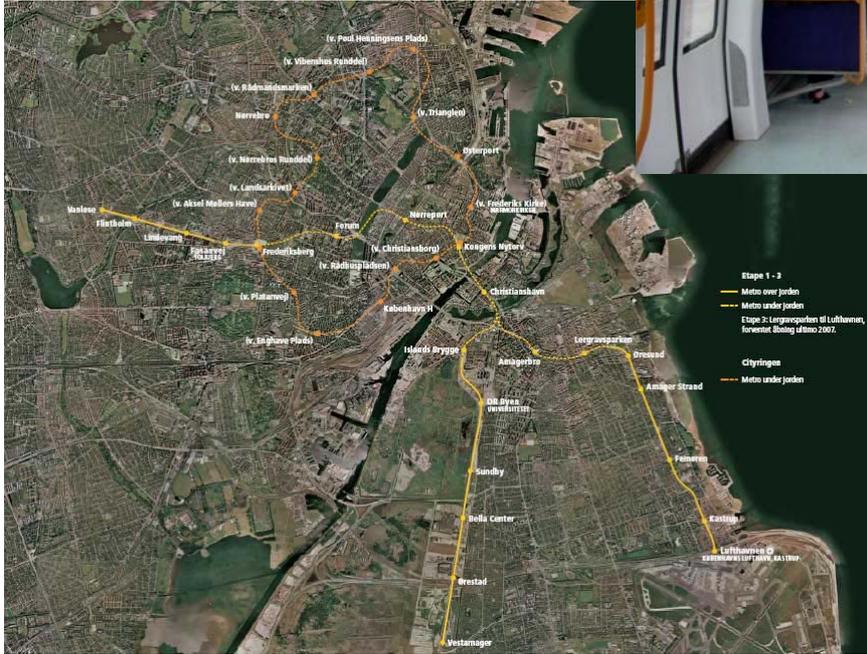
Mis en service à partir de 2002, le réseau actuel compte 2 lignes (M1 et M2), soit 21 Km (40% en souterrain) et 22 stations. Il s'agit d'un métro automatique exploité avec des véhicules et des automatismes ANSALDO.

2 autres lignes sont en projet (M3/M4 - Cityringen) qui constitueront une desserte circulaire couvrant 15 Km (entièrement en souterrain) et comprenant 17 stations. La mise en service est envisagée à l'horizon 2016-2018.

Matériel ANSALDO

Lignes M1 et M2

- Roulement fer
- 2,65 m x 39 m – 3 voitures - Intercirculation
- Automatismes Ansaldo (Union Switch & Signal)
- 9 800 voy./h (max. 16 000 voy./h)



La future ligne Cityringen desservira les principaux secteurs du centre

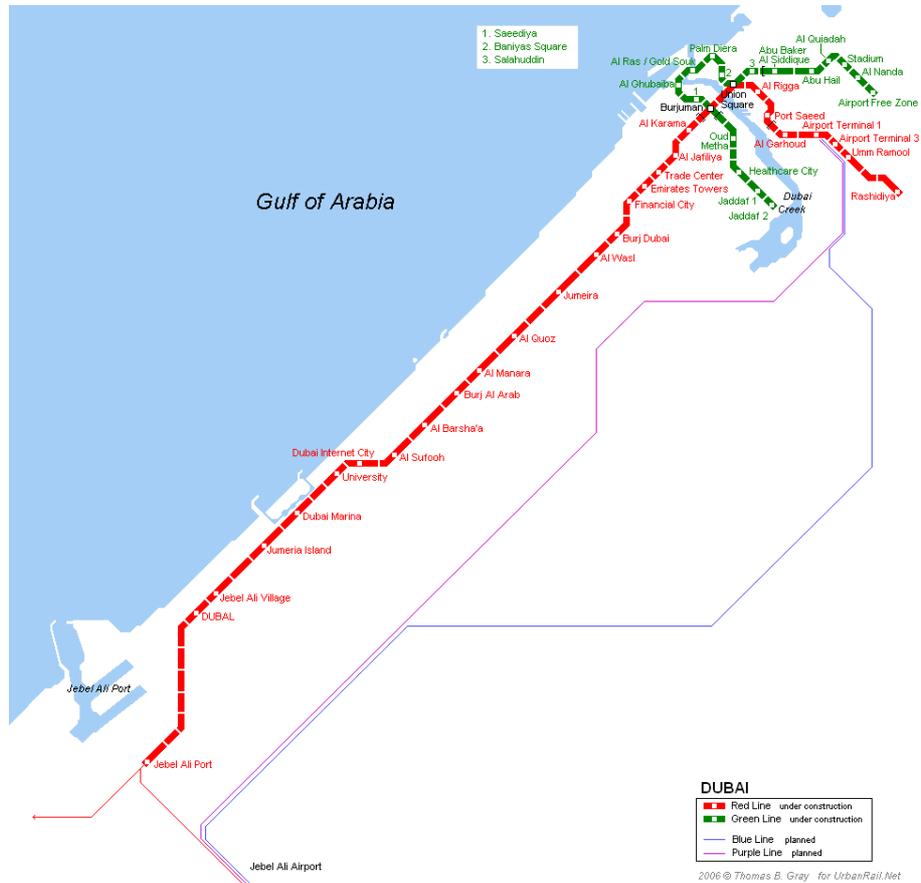
Un système utilisant la même technologie est en cours de construction à Brescia (Italie) dont la mise en service est prévue en 2010.

1.3.4 Dubaï

Partie intégrante des Émirats Arabes Unis, Dubaï est une ville d'une superficie de 3 885 Km² et dont la population est de 1 190 000 habitants. Son développement spectaculaire a conduit les autorités à planifier un réseau de transport guidé ambitieux.

Il comprendra en particulier un système de métro automatique dont la mise en service est prévue pour 2009-2010. Ce réseau sera constitué, dans un premier temps, de 2 lignes actuellement en construction (Red Line et Green Line), soit 70 Km et 34 stations pour la plus grande partie en viaduc ou à niveau.

2 autres lignes sont en projet (Blue Line et Purple Line) sur 96 Km qui ouvriront à l'horizon 2012-2015. La ville de Dubaï aura alors un réseau de métro automatique de près de 170 Km.



Le contrat clef en main a été attribué à un consortium mené par MITSUBISHI.



Matériel MITSUBISHI

Green et Red Line

- Roulement fer
- 2,78m x 51,90 m/85,50 m –
- 3 ou 5 voitures – Intercirculation
- Automatismes THALES SelTrac
- 11 400 voy./h (max. 25 600 voy./h) ou 19 200 voy./h (max. 25 600 voy./h)



La ligne sera exploitée avec le matériel roulant ALSTOM Métropolis de la même famille que celui circulant à Singapour mais décliné dans une moindre largeur. Les automatismes sont fournis par SIEMENS. Un matériel similaire, mais avec cabine de conduite, équipe la ligne 2 du métro de Barcelone.

Matériel ALSTOM Métropolis

Linia 9

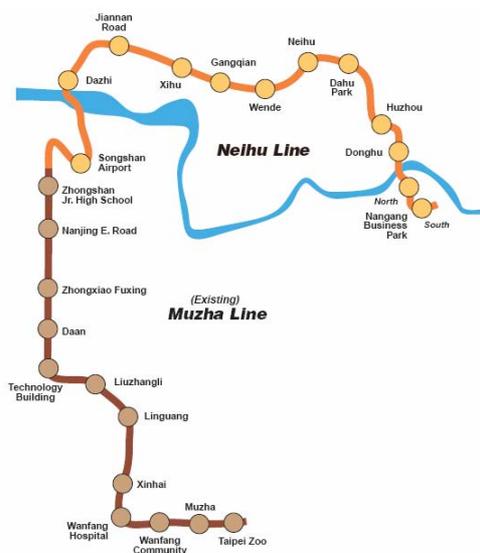
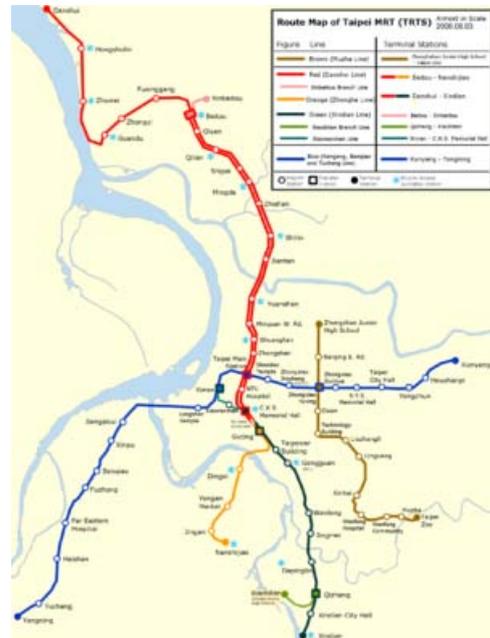
- Roulement fer
- 2,72m x 85,86 m – 5 voitures – Intercirculation
- Automatismes SIEMENS Trainguard
- 16 600 voy./h (max. 37 400 voy./h)



1.3.6 Taipei

Capitale de la République Chinoise (Taiwan), la ville de Taipei couvre une superficie de 272 Km² et a une population de 2 630 000 d'habitants. Elle est desservie, entre autres, par un réseau de métro comprenant 6 lignes sur 76 Km et 71 stations.

Une des lignes (Muzha Line - 11 Km et 12 stations entièrement en viaduc ou à niveau), mise en service en 1996, est un métro automatique.



Une nouvelle ligne de métro automatique (Neihu Line - en réalité la phase 2 de la Muzha Line) est en construction sur 15 Km et 12 stations en grande partie en viaduc. Elle sera mise en service en 2009 et desservira l'aéroport.



Rames SIEMENS VAL 256
 en exploitation sur la Muzha Line

La configuration des nouveaux véhicules assurera des fonctionnalités et des interfaces physiques identiques à celles des véhicules d'origine de la Muzha Line. Après le déploiement des nouveaux automatismes, la nouvelle flotte de 202 véhicules et la flotte originale de 102 véhicules seront interchangeables d'une ligne à l'autre.

Sur la Muzha Line, circulent depuis 1996 des rames de type VAL 256 formées de deux « doublets » soit quatre voitures au total. Le marché du matériel roulant et des automatismes de la Neihu Line a cependant été attribué à BOMBARDIER en juin 2003. Dans ce cadre, le système ATC/ATO à canton mobile de BOMBARDIER (CITYFLO 650) remplacera le système à canton fixe actuellement en place sur les 102 voitures VAL 256 de la Muzha Line.



Futures rames BOMBARDIER pour la Neihu Line
 (image de synthèse)

Matériel BOMBARDIER

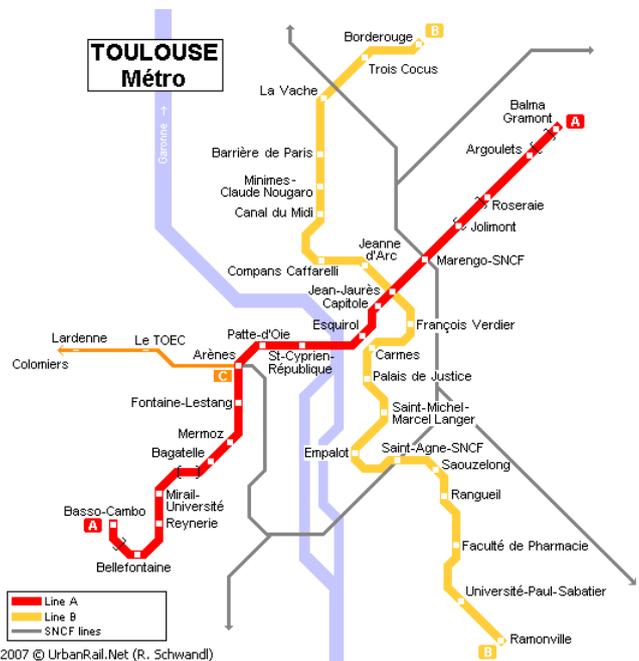
Neihu Line (et Muzha Line)

- Roulement pneu
- 2,54m x 55,12 m – 4 voitures
- Automatismes BOMBARDIER Cityflo 650
- 11 400 voy./h (max. 15 200 voy./h)

1.3.7 Toulouse

Le Grand Toulouse couvre une superficie de 366 Km² et a une population de 870 000 habitants.

Avec la mise en service de la ligne A du VAL en 1993, Toulouse a été la deuxième ville française à s'équiper d'un métro automatique 10 ans après Lille. Le réseau actuel comporte 2 lignes en exploitation avec un total de 28 Km et 36 stations.



L'exploitation de la ligne A a commencé avec du matériel ALSTOM VAL 206 équipés d'automatisme MATRA. Puis, à la suite du rachat de MATRA par SIEMENS en 2001, le prolongement de la ligne A et la ligne B se sont faits avec du matériel SIEMENS VAL 208. Aujourd'hui, le parc exploité est donc mixte au niveau des matériels roulants qui ont cependant des caractéristiques très similaires.



Matériel SIEMENS VAL 208

Ligne A et B

- Roulement pneu
- 2,08 m x 26,14 m – 2 voitures
- Automatisme SIEMENS
- 7 100 voy./h (max. 12 600 voy./h)



Matériel MATRA (ALSTOM) VAL 206

Ligne A

- Roulement pneu
- 2,06 m x 26,14 m – 2 voitures
- Automatisme SIEMENS (MATRA)
- 7 100 voy./h (max. 12 600 voy./h)

La ligne A, ouverte il y a 15 ans, se trouve aujourd'hui saturée. Elle est de fait exploitée au maximum de la capacité autorisée en matière de fréquence (environ 75-80 secondes). La ligne avait cependant été conçue avec une réserve physique de capacité

en construisant la plupart des stations (14 sur 18) avec des quais de 52 mètres. Ceci permet à terme l'exploitation avec des rames de deux doubles.

En 2005, les travaux de mise à niveau de la longueur des quais dans toutes les stations ont été décidés. La mise en service des rames de quatre voitures est prévue pour l'automne 2013. En raison des travaux, la ligne ne fonctionnera pas pendant cinq semaines durant les vacances d'été 2011, 2012 et 2013. Le coût des travaux est estimé à 230 millions d'euros dont 30 pour l'achat des rames supplémentaires.

Lille suit le même chemin pour ce qui concerne la ligne 1 initialement construite, elle aussi, avec des quais de 52 mètres.

1.4 PRINCIPAUX CONSTRUCTEURS ET PRINCIPAUX PRODUITS

Dans la perspective d'un système existant « sur catalogue », la première analyse a porté sur les produits proposés par les différents constructeurs et fournisseurs.

Le tableau ci-après permet de repérer ces différents produits dans les catégories « matériel roulant » et « automatisme ». Les produits surlignés en jaune sont ceux qui composent les métros automatiques récemment mis en service ou en construction. Ceux surlignés en vert sont les produits en développement.

	Matériel roulant	Automatismes
ALSTOM :	VAL 206, MPL85, MP89, Métropolis	Urbalis
SIEMENS :	VAL 208, VAL 256, DT3 (Nuremberg), CityVal	Trainguard
BOMBARDIER :	MK I (ICTS-UTDC), MK II (ART), B92 et B2006 (Docklands), Matériel Neihu Line (Taipei), CX 100	CityFlo 650
ANSALDO	Matériel Copenhague et Brescia	Ansaldo CBTC (Union Switch & Signal)
MITSUBISHI	Dubaï, Série 7000 (Tokyo), New Transit (Yokohama), Crystal Mover	Nippon Signal
ROTEM	XG EMU	
THALES		SelTrac

L'examen du tableau appelle les remarques suivantes :

- Le catalogue de produits est assez fourni et il s'agit, pour la plupart, de produits opérationnels sur plusieurs sites ;
- La plupart des constructeurs / fournisseurs proposent des produits matériel roulant aussi bien qu'automatismes :
 - ROTEM, constructeur coréen, a pour l'instant bâti sa réputation à l'extérieur de la Corée du Sud sur un seul modèle de matériel roulant (XG EMU – Electrical Multiple Unit) qui s'adapte aussi bien aux métros traditionnels qu'aux métros automatiques ou aux dessertes suburbaines de type RER ;
 - THALES (Acatel-Lucent) a développé un produit « automatismes » adaptable à différents matériels roulants ;

Combinaison matériel roulant/automatismes
(nombre de lignes concernées)

AUTOMATISMES MATÉRIEL ROULANT	AUTOMATISMES										TOTAL	Km de ligne correspondant
	ALSTOM	SIEMENS	MITSUBISHI	BOMBARDIER	BREDA/ANSALDO	KAWASAKI	THALES (Acatel)	Westinghouse	Niigata Transys			
ALSTOM	4	9	-	-	-	-	-	-	-	-	13	205,10
SIEMENS	-	8	-	1	-	-	-	-	-	-	9	118,20
MITSUBISHI	-	-	5	-	-	-	2	-	-	-	7	123,50
BOMBARDIER	-	-	-	6	-	-	5	2	-	-	13	189,60
BREDA/ANSALDO	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2	34,40
ROTEM	-	1	-	-	-	-	3	-	-	-	4	73,80
KAWASAKI	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2	15,20
Niigata Transys	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	1	7,90
Total	4	18	5	7	2	2	10	2	1	51	763,50(*)	
Km de ligne correspondant	63,60	216,10	53,90	112,60	34,40	15,20	252,80	14,90	7,90		763,50(*)	

(*) Lecture du tableau :

- Les totaux de pied de colonne indiquent le nombre de lignes de métro dont les automatismes ont été fournis par le constructeur en tête de colonne, ainsi que les kilomètres de ligne correspondants ;
- Les totaux de fin de ligne indiquent le nombre de lignes de métro dont le matériel roulant a été fourni par le constructeur en début de ligne, ainsi que les kilomètres de ligne correspondants.

Le nombre de lignes n'est pas forcément cohérent avec celui de l'inventaire et les totaux kilométriques ne sont pas forcément les mêmes en ligne et en colonne car certaines infrastructures peuvent avoir des matériels roulants et des automatismes de plusieurs origines (ex. : Muzha Line de Taipei ou Ligne A de Toulouse)

Le deuxième tableau ci-dessus illustre, sur la base d'un échantillon plus exhaustif et de manière plus détaillée, les différentes combinaisons matériel roulant / automatismes que l'on trouve sur les métros automatiques qui font l'objet de l'inventaire.

On peut ainsi constater que :

- De nombreuses combinaisons sont possibles en fonction des opportunités et des stratégies d'achat des maîtres d'ouvrage ;
- Les fournisseurs qui proposent les deux produits (matériel roulant et automatismes) s'associent fréquemment avec leurs concurrents ;
- Pour ce qui est du matériel roulant, ALSTOM, BOMBARDIER et SIEMENS couvrent près de 70% des systèmes existants ;
- Pour ce qui est des automatismes, SIEMENS, THALES et BOMBARDIER couvrent près de 60% des systèmes existants.

1.5 TYPOLOGIE

1.5.1 Réserve de capacité

Le dimensionnement physique (caractéristiques du matériel roulant et dimensionnement des stations) est lié certes au trafic attendu à l'ouverture, mais également au trafic pressenti à long terme. Deux paramètres résument cette problématique : la fréquence et le nombre maximal de véhicules par rame autorisé par la longueur des quais.

Le tableau ci après donne quelques exemples des marges de manœuvre qui ont été prises pour différents métros automatiques. Il fait apparaître des réserves de capacité très variables d'une infrastructure à l'autre.

LOCALISATION			ÉLÉMENTS RELATIFS À LA RÉSERVE DE CAPACITÉ				CAPACITÉ			
Pays	Ville	Ligne	Véhicules/rame (nominal)	Véhicules/rame (maximal)	Intervalle HP (nominal)	Intervalle minimal réalisable	Unitaire (voy./rame 4 voy./m ²)	Ligne actuel HP (voy./h)	Ligne max (*) (voy./h)	Réserve de capacité
Canada	Vancouver	Canada Line	2	2	180 s	90 s	340	6 800	13 600	100%
Danemark	Copenhague	Ørestad Line	3	4	110 s	90 s	300	9 800	16 000	63%
Dubai	Dubai	Green Line	3	5	120 s	90 s	380	11 400	25 300	122%
Dubai	Dubai	Red Line	5	5	120 s	90 s	640	19 200	25 600	33%
Espagne	Barcelone	Ligne 9	5	5	180 s	80 s	830	16 600	37 400	125%
France	Toulouse	Ligne A	2	4	80 s	90 s	158	7 100	12 600	77%
Singapour	Singapour	Circle Line	3	3	180 s	90 s	690	13 800	27 600	100%
Singapour	Singapour	North-East Line	6	6	180 s	90 s	1 380	27 600	55 200	100%
Singapour	Aéroport	Changi Skytrain	2	3	90 s	60 s	210	8 400	18 900	125%
Taiwan	Taipei	Muzha Line	4	4	170 s	90 s	360	7 600	14 400	89%
Taiwan	Taipei	Neihu Line	4	4	120 s	90 s	380	11 400	15 200	33%

(*) La capacité en ligne maximum correspond au nombre maximum de véhicules par rame circulant à l'intervalle minimum réalisable.

Un tableau identique mais couvrant l'ensemble des sites de l'inventaire est fourni en annexe.

On peut constater, d'autre part, que l'approche la plus fréquente est celle qui consiste à jouer sur l'intervalle entre les rames sur la durée. Ceci conduit à mettre en service avec un intervalle de 3 minutes ou plus dans 40% des cas.

De fait, la possibilité d'évoluer vers des rames plus longues n'est prévue que dans moins de 40% des cas. Parmi les systèmes suffisamment anciens, seuls Lille (après 25 ans) et Toulouse (après 15 ans) s'apprêtent à mettre en œuvre l'allongement des rames qui étaient inscrit dans la conception initiale de l'infrastructure.

Prévoir des marges de manœuvre adéquates est à l'évidence indispensable comme le montre le cas du Docklands Light Railway de Londres. A l'exception des prolongements récents, les stations ont toutes été construites avec des quais de 60 m qui avaient été prévus pour accueillir des rames d'au maximum deux éléments (actuellement en exploitation).

En raison du succès de cette ligne ouverte il y a plus de 20 ans, il s'avère cependant impératif de rajouter un troisième élément sur les trains. Ceci implique de rallonger les quais de quelques 20 stations. Dans un cas (Cutty Sark), ce n'est pas possible et cela obligera à condamner l'ouverture des portes d'une voiture lors de l'arrêt. Dans un autre cas (South Quay), cela impose de déplacer la station de 200 m (construction d'une nouvelle station et démolition de l'ancienne). De plus, quelques 70 ponts et viaducs doivent être structurellement modifiés et/ou renforcés pour supporter les contraintes de poids supplémentaire.

Le coût total de l'opération est estimé à M£200, soit environ 300 M€ pour la seule partie génie civil et infrastructure. Les travaux devraient être achevés en 2010.

1.5.2 Caractéristiques de développement

Les métros automatiques ont connus, depuis les premières mises en service au début des années 80, un fort développement accompagné par d'importantes évolutions des technologies liées. Entre 1981 et 1999, 20 lignes de métros automatiques ont été construites de par le monde. Entre 2000 et 2013, ce sont 27 lignes nouvelles lignes qui ont été mises en service ou le seront.

À cela se rajoute la mise en automatique de lignes existantes comme la ligne 1 du métro de Paris. Certaines lignes existantes sont également équipées en automatismes de conduite de type CBTC (voir ci-après), même si on ne supprime pas le conducteur pour l'instant : ligne 2 à Barcelone, ligne 2 à Budapest, ligne L (Carnegie) à New York par exemple.

Ces évolutions sont par ailleurs marquées par :

- Le développement du roulement fer par rapport au pneu :

Tous les systèmes inventoriés :	47% de roulement fer,
Systèmes depuis 2000 :	63% de roulement fer,
<i>(y compris ceux en construction)</i>	
Systèmes en construction :	81% de roulement fer ;

Ceci est probablement du en partie au désir des maîtres d'ouvrage de se démarquer de systèmes trop « propriétaires » (matériel + automatismes + voie) qui limitaient les stratégies d'achat.

Les progrès technologiques (informatique, puissance de calcul, électronique, télétransmissions, etc.) y sont également pour quelque chose, qui ont permis une aussi bonne précision d'arrêt avec le fer qu'avec le pneu.

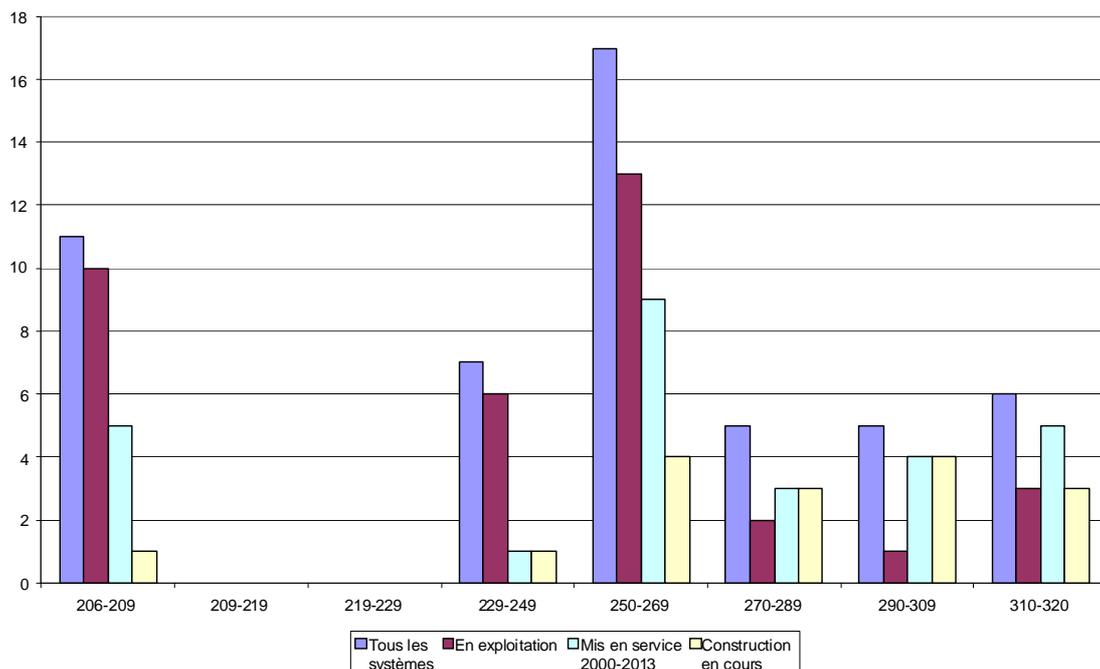
- Le développement de nouvelles technologies de guidage : système NEOVAL développé par SIEMENS sur la base du guidage développé par LOHR pour les véhicules de tramway sur pneu.



1.5.3 Dimensions des véhicules

L'examen des dimensions des véhicules conduit à constater une évolution nette vers des matériels plus larges. La largeur moyenne pour les systèmes inventoriés se répartit comme suit :

Tous :	259 cm
<i>(y compris ceux en construction)</i>	
En exploitation :	250 cm
Mis en service avant 2000 :	247 cm
Mis en service sur 2000-2013 :	270 cm
<i>(y compris ceux en construction)</i>	
En construction :	280 cm



Suivant une autre perspective, le graphique ci-avant illustre, dans les mêmes catégories, le nombre de lignes de métros automatiques par classe de largeur. La classe qui se trouve à gauche du graphique correspond au VAL 206 et 208.

1.5.4 Conclusions

L'inventaire fait apparaître :

- des systèmes de transport urbains automatiques diversifiés ;
- des technologies et des techniques maîtrisées ;
- un marché mondial dynamique et concurrentiel ;

Le « catalogue » des métros automatiques comporte de nombreux produits sur catalogue (matériel roulant et automatismes) qui se caractérisent par :

- Un bon niveau de modularité,
- De multiples possibilités de combinaisons pour les différentes composantes du système qui permettent une appréciable diversité des stratégies d'achat,
- Un choix assez large de systèmes d'exploitation.

De plus, de nombreux exemples montrent que les évolutions technologiques restent possibles sur la durée de vie d'un système.

Sur la base de ces éléments, il paraît effectivement nécessaire de consulter les principaux constructeurs pour acquérir une connaissance assez fine et réaliste de leurs produits

2. CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES

2.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA LIGNE ET DE L'EXPLOITATION

Les caractéristiques des lignes et de l'exploitation ont été traitées dans la section précédente « INVENTAIRE » et sont en particulier détaillées dans le tableau récapitulatif par pays, ville et ligne de métro automatique.

2.2 CARACTÉRISTIQUES DU MATÉRIEL ROULANT

Les caractéristiques physiques (dimensions, capacité, etc.) des matériels roulants concernés sont également traitées dans la section précédente « INVENTAIRE » et sont en particulier détaillées dans le tableau récapitulatif par pays, ville et ligne de métro automatique.

Leurs caractéristiques détaillées font par ailleurs l'objet de fiches en annexe

2.3 CARACTÉRISTIQUES DES AUTOMATISMES

Lorsqu'on parle de métro automatique et d'automatismes, un certain nombre de sigles et de notions sont fréquemment utilisés qu'il convient d'éclairer et de préciser.

L'automatisation est un terme défini précisément par la norme IEC 62290-1 qui définit trois niveaux d'automatisation :

- Niveau 2 : STO (Semi-automated Train Operation : semi-automatique, donc avec conducteur) ;
- Niveau 3 : DTO (Driverless Train Operation : sans conducteur) ;
- Niveau 4 : UTO (Unattended Train Operation : sans personnel à bord).

Les métros automatiques dont il est question appartiennent aux deux dernières catégories.

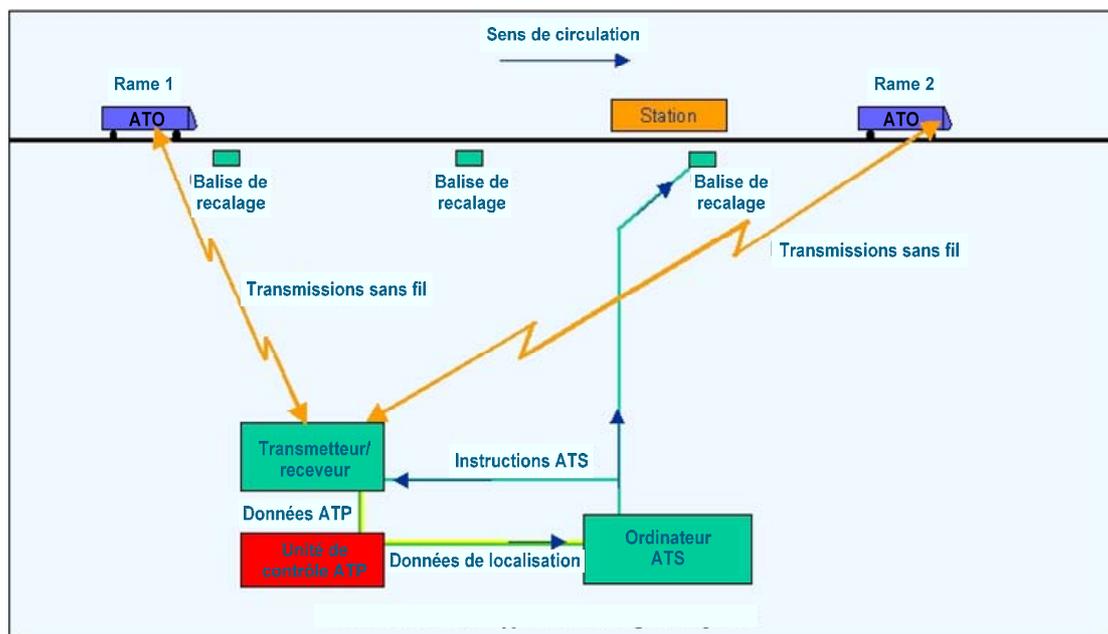
Dans tous les cas, le cœur du système est l'**ATC** (Automatic Train Control : contrôle automatique du train). De fait, dans son acceptation moderne, le terme ATC fait référence à un ensemble intégré dont l'architecture s'articule autour des « produits » suivants :

- **ATP** (Automatic Train Protection : protection automatique des trains) :
Il s'agit des automatismes correspondant à la signalisation.
L'ATP est à la base de la circulation en sécurité des trains (espacement et manœuvre) et donc de l'autorisation de circuler et du contrôle de vitesse.
- **ATO** (Automatic Train Operation : conduite automatique des trains) :
Il s'agit des automatismes de conduite automatique à proprement parler.
L'ATO « conduit » le train en appliquant les consignes de sécurité et de vitesse issues de l'ATP et les consignes de temps d'arrêt en station issues du programme d'exploitation.
La vitesse et les temps d'arrêt peuvent être « régulées » par l'ATS (voir ci-après).
- **ATS** (Automatic Train Supervision : supervision automatique des trains) :
Il s'agit des automatismes de gestion et de supervision de la circulation des trains sur l'ensemble de la ligne.

L'ATS fait en général partie intégrante d'un système dit **SCADA** (Supervisory Control And Data Acquisition : contrôle de supervision et acquisition de données) qui assure la supervision, le suivi et le contrôle de l'exploitation de la ligne (ou du réseau) au regard de la disponibilité, de la sécurité (des personnes et des biens) et du maintien de la qualité de service.

Ces fonctions sont le plus souvent rassemblées au niveau d'un PCC (Poste de Commande Centralisé).

Il existe de nombreuses variantes d'ATC de part le monde. Il est cependant toujours caractérisé par le même schéma dans lequel : l'ATP assure la sécurité de circulation des trains et l'ATO est là pour « remplacer » le conducteur pendant que l'ATS vérifie l'adéquation à l'horaire et ajuste la marche des train en conséquence.



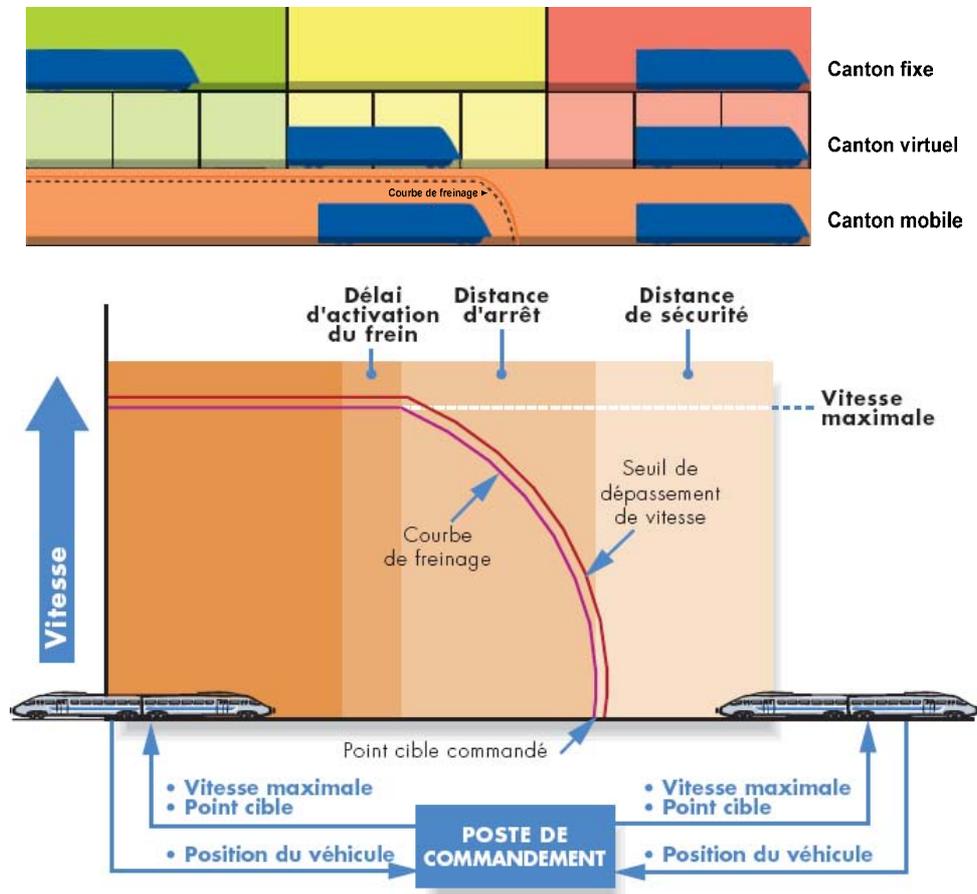
Représentation schématique d'un système d'ATC utilisant des transmissions sans fil (voir CBTC ci-après)

L'ATP a évidemment une fonction primordiale puisqu'il maintient les trains à une distance de sécurité les uns des autres. Cette fonction est assurée sur la base du positionnement dynamique respectif des trains. Le positionnement d'un train est caractérisé par la section de ligne, appelé **canton**, qu'il occupe à un instant donné.

Avec les évolutions successives de l'automatisation, cette notion à évoluer de la façon suivante :

- **Canton** de longueur **fixe** matérialisé par un circuit de voie :
 - d'une longueur assez conséquente quand la signalisation est latérale,
 - avec un découpage plus fin quand on passe à la signalisation en cabine.
 Le sous-découpage des cantons trouve néanmoins ses limites dans des considérations de coût d'investissement et de maintenance.
- **Canton** fixe « **virtuel** » qui n'est matérialisé que dans un support électronique :
 Un sous-découpage fin est possible sans réel surcoût.
- **Canton** **mobile** qui est de fait un système de positionnement continu des trains :
 Le « canton » en tant que tel n'existe plus.

L'ATP calcule en dynamique les consignes de sécurité basées sur la position exacte des trains.



Les évolutions technologiques qui ont permis de passer au cantonnement virtuel, puis au canton mobile ont donné naissance à la notion de **CBTC** (Communication Based Train Control, en français « commande de la marche des trains basée sur les télécommunications »). Il s'agit d'un système de contrôle automatique du trafic ferroviaire (train ou métro).

Le système CBTC est décrit par une norme internationale IEEE 1474, définie en 1999. D'après cette norme, les principales caractéristiques d'un CBTC sont :

- Localisation des trains indépendante des circuits de voie,
- Transmission haut débit entre les équipements sol et les trains,
- Constitué par des ordinateurs situés à la fois au sol et dans les trains,

Généralement un ordinateur central situé au sol gère toutes les rames qui opèrent en ligne. Cela permet d'obtenir des rames qui arrivent dans les stations de manière régulière et de réduire l'intervalle entre deux rames aux heures de pointe (90 secondes en moyenne). L'ordinateur central envoie ainsi différentes informations à un ordinateur situé à bord de chaque rame.

Plusieurs technologies sont utilisées pour réaliser les échanges haut débit entre les équipements sol et les trains. La transmission peut se faire soit :

- par le rail, c'est le cas sur certains réseaux anglais et américains ;
- par tapis de sol, c'est le cas, par exemple de la ligne 14 de Paris et de la plupart des métros automatiques construits ces quinze dernières années ;
- par radio, c'est le cas, par exemple de la Northeast Line de Singapour (la première à utiliser cette technologie) ainsi que de la plupart des métros automatiques en cours de construction.

Le CBTC est donc intimement lié à l'automatisation des métros et regroupe les trois fonctionnalités principales de l'ATC : ATP ; ATO et ATS.

Le plus souvent, l'ATC ou la CBTC doit prendre en compte un ensemble plus vaste de systèmes auxiliaires qui assurent la gestion et l'exploitation :

- de la commande des itinéraires (enclenchements de sécurité) ;
- de la signalisation de manœuvre et d'espacement si la ligne doit prendre en compte des trains non équipés d'automatismes ;
- des équipements d'interface voie-quai (portes palières, détecteurs, etc.) ;
- de l'alimentation en énergie (haute et basse tension) ;
- des équipements de sécurisation des personnes et des biens (vidéosurveillance, alarmes diverses, protection incendie, etc.) ;
- des équipements de communication (communication d'urgence, information voyageurs, etc.).

Ceci implique une approche intégrée qui prenne en compte :

- Les problématiques d'interfaçage avec les différents systèmes auxiliaires,
- Les éventuelles exigences d'interopérabilité et de mixité des circulations,
- Les nécessités d'interchangeabilité des sous-systèmes (stratégie d'achat multi-sources).

Dans le domaines des automatismes, il y a cinq fournisseurs principaux de produits homologués (ou en cours d'homologation sur le marché européen) : ALSTOM, ANSALDO (Union Switch & Signal), BOMBARDIER, SIEMENS et THALES (Alcatel-Lucent). Tous proposent évidemment l'ATP et l'ATO complétés par une approche modulaire pour les autres fonctions et/ou l'interfaçage avec les différents sous-systèmes.

Le tableau ci-après fournit un descriptif sommaire des produits concernés. Des informations plus détaillées seront collectées directement auprès des constructeurs et fournisseurs au travers des entrevues (voir section 4.3 de ce document). Il s'agira de rechercher les spécificités éventuelles propres à chaque produit, notamment :

- l'étendue, la localisation et l'encombrement des équipements au sol,
- les facteurs liés à l'interopérabilité et à l'interchangeabilité.

	ALSTOM	ANSALDO (Union Switch & Signal)	BOMBARDIER	SIEMENS	THALES (Alcatel-Lucent)
Nom	URBALIS	CBTC	CITYFLO	TRAINGUARD	SELTRAC
CBTC	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Canton	Mobile	Mobile	Mobile	Mobile	Virtuel ou mobile
Fonctions principales					
ATP		Zone Controller		Oui	Oui
ATO	MASTRIA	Car-borne Controller	EBI Cab	Oui	Oui
ATS	ICONIS	Central office	EBI Screen	Module optionnel	NetTrac
Transmission de données	Radio	Radio	Radio	AIRLINK - Radio ou tapis	Radio
Fonctions auxiliaires					
Commande d'itinéraires	SMARTLOCK	Interlocking Controller	EBI Lock		NetTrac
Enclenchements					LocTrac
Signalisation traditionnelle (mixité des circulations)	SMARTWAY			Modules optionnels	
Interfaçage autres sous-systèmes	Oui	Central Office	EBI Screen		NetTrac
Sites					
Utilisation STO (exemples)	Ligne2 Pékin Ligne5 Milan		Ligne 1 et 6 Madrid	Carnasie Line New York M2 Budapest M3, 5, 9, 10 et 12 Paris	Jubilee, Northern et Picadilly lines Londres
Utilisation DTO/UTO (exemples)	NEL et CL Singapour M2 Lausanne	M1, 2, 3 et 4 Copenhague Ligne 1 Brescia	Neihu Line Taipei	M4 Budapest L9 Barcelone M1 et 14 Paris	DLR Londres Skytrain et Canada Line Vancouver JFK Airtrain New York

2.4 CARACTÉRISTIQUES DES INFRASTRUCTURES

2.4.1 Infrastructures en section courante

2.4.1.1. Tracés en plan et en profil

Les données fondamentales pour l'établissement des tracés en plan et en profil des lignes de métros automatiques sont les suivantes :

- rayon planimétrique minimal ;
- pente maximale en profil en long ;
- rayon de raccordement altimétrique minimal ;

- contraintes spécifiques (planimétriques et altimétriques) au droit des stations : alignements droits et paliers ;
- contraintes spécifiques (planimétriques et altimétriques) au droit des appareils de voies : alignements droits.

Ces données dépendent des conditions de confort des voyageurs retenues (accélérations transversales et longitudinales, insuffisances de dévers, par exemple), mais peuvent également varier sensiblement d'un système à l'autre.

Les valeurs minimales des rayons planimétriques sont en général limitées pour ne pas pénaliser la vitesse de circulation des trains (qui peut varier suivant les projets entre 60 et 80 Km/h).

Pour ces vitesses et en fonction du dévers pratique maximum et de l'insuffisance de dévers acceptés, les rayons planimétriques minimum en ligne souhaitables sont compris entre 220 m (dévers : 12 %) et 250 m (dévers : 10.5 %).

En entrée et en sortie de stations où la vitesse des trains est limitée, des valeurs plus réduites peuvent être admises.

Dans le cas des tunnels forés à l'aide de tunneliers, le rayon en plan du tracé du tunnel peut être limité par le tunnelier lui-même en fonction de son diamètre et de sa longueur. A titre d'exemple, on peut en effet considérer que le rayon minimum souhaitable pour un bouclier de 8 m de diamètre est de l'ordre de 200 m environ. Pour des boucliers de diamètre supérieur, le rayon minimum souhaitable est de l'ordre de 250 m.

La pente maximale en profil en long et le rayon de raccordement altimétrique minimal sont des éléments importants, en particulier pour les projets pour lesquels il est utile de pouvoir faire « plonger » rapidement la ligne :

- Entre deux stations par exemple (profil en chaînette pour intercepter des formations géologiques plus favorables ou pour éviter des obstacles enterrés) ;
- Dans une zone de transition entre viaduc et tunnel (franchissement en viaduc ou en pont d'un fleuve ou d'infrastructures existantes) ;
- En cas de forte pente du terrain naturel.

En ce qui concerne les pentes maximales, les valeurs dépendent du système et, plus précisément, du mode de roulement (fer ou pneu) et de la motorisation des trains.

A titre d'exemple, les lignes des métros de Lille, Toulouse et Rennes, exploitées avec le système VAL (roulement pneu) comportent des pentes de 7 %, voire davantage. La ligne M2 du métro de Lausanne, exploitée à l'aide d'un métro sur pneu composée de deux motrices MP89 ALSTOM, comporte des pentes atteignant 12%.

En ce qui concerne les matériels sur fer, la pente maximale est, en général, comprise entre 4 et 6%.

Les rayons de raccordement altimétrique ont habituellement des valeurs minimales de l'ordre de 2 000 à 2 500 m. Pour certains projets (métros de Lille, Toulouse et Rennes par exemple), des valeurs plus réduites (1 250 m) sont admises.

2.4.1.2. Dimensions intérieures des ouvrages

Les infrastructures en ligne peuvent être aériennes ou souterraines :

- Infrastructures aériennes :
 - remblais /déblais/plateforme,
 - viaducs ;
- Infrastructures souterraines
 - tranchées couvertes,
 - tunnels profonds réalisés à l'aide de procédés semi mécanisés conventionnels,
 - tunnels profonds forés au tunnelier.

Dans le cas des viaducs et des tunnels, les ouvrages peuvent consister en :

- un ouvrage unique à deux voies,
- deux ouvrages à voie unique.

Le choix entre ces deux solutions est spécifique à chaque projet. On note cependant que les projets souterrains comportant des matériels roulants larges ne comportent pas en général de tunnels à deux voies mais sont conçus sur la base de deux tunnels à voie unique :

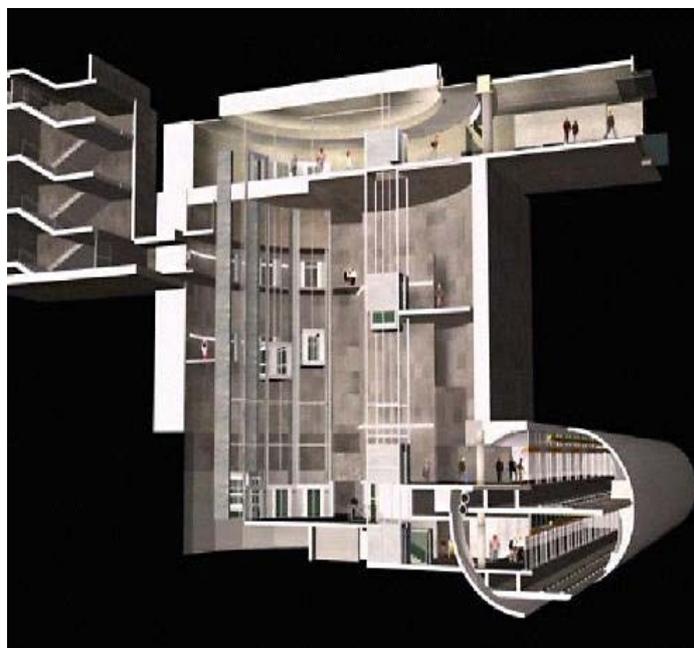
- Métro de Copenhague (largeur des trains : 2,65 m),
- Métro de Lyon (largeur des trains : 2,90 m),
- Métro de Vancouver (largeur des trains : 3,00 m),
- Métro de Singapour (largeur des trains : 3,20 m), par exemple.



Vancouver – Canada Line : sortie du tunnelier à hauteur de la station Waterfront

La première solution (tunnel ou viaduc à deux voies) est, en général, associée à des stations à quais latéraux.

La deuxième solution (tunnel ou viaduc à voie unique) est, en général, associée à des stations à quai central ou à quais superposés. Cette deuxième solution présente l'avantage de réduire la largeur intérieure de la station et de limiter le nombre d'escaliers mécaniques et d'ascenseurs.



D'autres typologies, type ligne 9 du métro de Barcelone, sont également envisageables. Cette typologie originale, directement liée à la grande profondeur du niveau des quais, est basée sur la réalisation d'un tunnel de grandes dimensions (diamètre du bouclier 12 m) dans lequel :

- En interstation, les deux voies sont superposées ;
- Au droit des stations, la dimension du tunnel permet la mise en place de quais superposés de 4,30 m de largeur et de 100 m de longueur. La liaison avec la surface est assurée par des ascenseurs (6 ascenseurs de 40 personnes) implantés dans un puits circulaire de 26 m de diamètre intérieur.

Les dimensions intérieures de ces ouvrages dépendent non seulement des caractéristiques du matériel roulant mais également :

- des équipements en ligne (câbles, colonnes sèches ...),
- de celles du tracé (alignement droit ou courbe),
- et des réglementations locales notamment en matière d'évacuation des voyageurs et de lutte contre l'incendie (colonnes sèches, largeur des pistes d'évacuations d'urgence par exemple).

A titre d'exemple, les diamètres intérieurs des tunnels circulaires forés à l'aide de tunneliers des métros automatiques de Toulouse, Paris, Copenhague, Brescia, Lyon, Vancouver et Singapour sont les suivants :

	Matériel	Largeur des trains	Diamètre intérieur tunnel à voie unique	Diamètre intérieur tunnel à deux voies
Métro de Toulouse : Lignes A et B	SIEMENS VAL 206/208	2,08 m	4,50 m	6,80 m
Métro de Paris : Ligne 14	ALSTOM MP89	2,45 m		7,50 m
Métro de Copenhague : Ørestad Line	ANSALDO	2,65 m	4,90 m	
Métro de Brescia	ANSALDO	2,65 m		8,15 m
Métro de Lyon : Ligne D	ALSTOM MPL85	2,90 m	5,30 m	
Métro de Vancouver : Canada Line	ROTEM XG EMU	3,00 m	5,30 m	
Métro de Singapour : Northeast Line	ALSTOM Métropolis	3,20 m	5,80 m	

2.4.2 Stations

Les stations peuvent être aériennes ou souterraines :

- station au sol,
- station en viaduc,
- station souterraine réalisée à ciel ouvert et/ou en souterrain.



Différentes typologies sont envisageables :

- stations à quai central,
- stations à quai latéral,
- stations à quais superposés.

La largeur des quais est dimensionnée en fonction du trafic voyageur. Elle est également déterminée en laissant une largeur suffisante entre le bord du quai et les obstacles sur les quais : escaliers fixes, escaliers mécaniques.

Cette largeur peut être réduite dans le cas de stations équipées de portes palières qui isolent les quais de la voie (70% des systèmes inventoriés). Dans ce cas, elle est, en général, comprise entre 3,00 et 3,50 m utiles.

Certains projets (ligne D du métro de Lyon, lignes du métro de Vancouver, ligne des Docklands de Londres, lignes dite LRT de Singapour) ne comportent pas de portes palières et sont équipés par contre de dispositifs de détection d'intrusion.

Les différents projets se distinguent également par la longueur des quais des stations qui dépend directement du trafic de la ligne.

A titre d'exemple, les longueurs des quais des stations des métros automatiques de Toulouse, Paris, Copenhague, Brescia, Lyon, Vancouver et Singapour sont détaillées dans le tableau ci-après.



	Systeme	Largeur des trains	Longueur des quais	Longueur des trains en exploitation
Métro de Toulouse : Lignes A et B	SIEMENS VAL 206/208	2,08 m	52 m	26 m
Métro de Paris : Ligne 14	ALSTOM MP89	2,45 m	120 m	90 m
Métro de Copenhague : Ørestad Line	ANSALDO	2,65 m	44 m	39 m
Métro de Brescia	ANSALDO	2,65 m	40 m	39 m
Métro de Lyon : Ligne D	ALSTOM MPL85	2,90 m	80 m	36 m
Métro de Vancouver : Canada Line	ROTEM XG EMU	3,00 m	50 m	41 m
Métro de Singapour : Northeast Line	ALSTOM Métropolis	3,20 m	140 m	139 m

Les stations comportent deux zones distinctes :

- les zones publiques où transitent et stationnent les voyageurs,
- les locaux techniques et locaux d'exploitation.

Elles peuvent éventuellement comporter des locaux commerciaux. Les zones publiques comportent d'une façon générale :

Accès en surface

- Les accès en surface : en général, deux accès dans le cas des stations souterraines pour des raisons de sécurité et d'évacuation des voyageurs en cas d'incendie ;
- La salle des billets comportant deux zones séparée par la ligne de contrôle : zone hors contrôle et zone sous contrôle. Cette séparation peut consister soit en un péage ouvert soit en un péage fermé (cas le plus courant) ;
- Les quais.



Quais

**Station BUANGKOK
NEL Singapour**

Salle des billets

La mécanisation des déplacements des voyageurs est, le plus souvent, effectuée à l'aide d'escaliers mécaniques entre le niveau des quais et celui de la surface. Le degré de mécanisation est, en général, différent en ce qui concerne l'entrée et la sortie en station et dépend directement des dénivelées entre le niveau du sol et celui des quais. Tous les projets récents comportent, en outre, des ascenseurs pour les personnes à mobilité réduite.

Certains projets comportent des stations qui ne comportent pas d'escaliers mécaniques et où la mécanisation des voyageurs est assurée seulement par des ascenseurs : métros de Toulouse et Rennes pour des stations de faible trafic et ligne 9 du métro de Barcelone par exemple.

Les locaux techniques et locaux d'exploitation en stations comportent en général :

- Des locaux destinés à l'exploitant : locaux nettoyages, ;
- Des locaux techniques abritant les équipements liés au système (alimentation électrique, automatismes, télé mesures et télé transmissions...) ;
- Des locaux techniques abritant les équipements non liés au système (ventilation/désenfumage, détection incendie, exhaure des eaux...).

Le dimensionnement de ces locaux est spécifique à chaque projet. Il tient compte de la conception d'ensemble du projet (et notamment, en matière ventilation /désenfumage), de la typologie de la station (aérienne ou souterraine), de la spécificité du système et des réglementations locales notamment en matière de sécurité et de lutte contre l'incendie.

Dans le cas de stations souterraines, la surface totale de ces locaux peut varier entre 500 et 1 000 m² suivant les systèmes. Pour les stations de dimensions réduites (par exemple, 50 m de longueur et 17 m de largeur, soit une surface totale de 850 m² environ), l'implantation de ces locaux même sur plusieurs niveaux peut être problématique et il importe, par conséquent, de réduire à leur strict minimum leurs surfaces pour ne pas augmenter les dimensions de la station et, par voie de conséquence, son coût de construction.

2.4.3 Garage / atelier

Les caractéristiques des garages et ateliers seront collectées directement auprès des constructeurs et fournisseurs au travers des entrevues (voir section 4.3 de ce document) en cherchant à mettre en évidence les spécificités éventuelles propres à chaque système et notamment en matière de :

- Politique générale de maintenance et sous-traitances,
- Voies d'essais destinées à tester les trains et leurs éventuels automatismes avant de les injecter en ligne,
- Gestion automatique des trains dans le garage/atelier,
- Système de levage par vérins à la place de fosses de visites,
- Machine à laver,
- Fosse à tour pour les matériels sur fer,
- Locaux spécifiques de stockage.

3. COÛTS, DÉLAIS ET RISQUES

3.1 COÛTS DE CONSTRUCTION

Collecter des informations sur les coûts de construction d'infrastructures de transport collectif, les comparer et en tirer des conclusions sur un projet dans sa phase d'études préliminaires est une tâche à la fois difficile et risquée :

- Obtenir des informations sur les coûts d'un projet de transport avec un tant soit peu de détail (génie civil + systèmes + matériel roulant au minimum) n'est pas chose aisée :
 - Sources d'information plus ou moins « bien informées » et parfois divergentes (presse spécialisée ; presse généraliste, communiqué de presse des constructeurs/fournisseurs et des maîtres d'ouvrage, informations sur les marchés publics, etc.) ;
 - Caractéristiques de l'information fournie (date, niveau de détails, périmètre, prix annoncé, réévaluations successives, prix définitif, etc.) ;
 - Stratégie d'achat employée et montage juridico-financier (concessions diverses, PPP, allotissement, etc.)
- Comparer ces informations reste très délicat :
 - Éléments influant la comparaison économiques (taux de change fluctuants, actualisation, etc.) ;
 - Éléments influant la comparaison technique (contraintes géologiques, topographiques, d'insertion, portion de ligne en souterrain, etc.).
- En tirer des conclusions fiables quant au coût d'une infrastructure à venir peut conduire à des appréciations sinon erronées du moins le plus souvent sans fondement solide en l'absence d'une connaissance des conditions exactes du terrain et d'un premier exercice sur l'insertion et les tracés.

A titre d'exemple :

- Le consortium mené par MITSUBISHI qui a remporté le marché du métro de Dubaï a proposé un prix substantiellement inférieur (-30%) à celui de ses concurrents et à l'estimation initiale : quand on sait le nombre et le montant des « réclamations » que peut susciter un tel marché, comment prédire le coût définitif à partir d'un coût annoncé d'environ 2 500 M€ ?
- La Canada Line de Vancouver est en cours de construction dans le cadre d'un PPP dans lequel une partie des investissements est à la charge des partenaires privés : sur la base d'un coût total annoncé de 1 300 M€, quel sera réellement le coût final, quel est le partage contractuel des risques et qui en supportera les éventuels surcoûts ?
- La construction de la ligne 9 du métro de Barcelone connaît apparemment quelques difficultés pouvant remettre en cause le design original du tunnel et des stations dans certaines sections : sur la base d'un coût prévu de 3 500 M€, une dérive de l'ordre de 20% est vraisemblable ;

Nous nous sommes donc limités à une approche assez globale en nous concentrant sur quelques exemples en France et en Europe présentés dans le tableau ci-après. Les coûts présentés, ingénierie et maîtrise d'ouvrage sont issus de différentes sources. Ils ont été actualisés dans la mesure du possible et arrondis. Ils représentent donc des ordres de grandeur.

PROJET	TOULOUSE		TURIN	BRESCIA	COPENHAGUE	
	Ligne B	Prolongement Ligne A	Ligne 1	Ligne 1	Ørestad M1 et M2	Cityringen M3 et M4
Matériel roulant	SIEMENS VAL 208	SIEMENS VAL 208	SIEMENS VAL 208	ANSALDO	ANSALDO	ANSALDO
Parc (rames)	56 ^(*)	14	18	18	34	25
Voitures/rame	2	2	4	3	3	3
Largeur des voitures (m)	2,08	2,08	2,08	2,65	2,65	2,65
Longueur des voitures (m)	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Automatismes	SIEMENS	SIEMENS	SIEMENS	ANSALDO	ANSALDO	ANSALDO
Ligne						
Longueur de la ligne (Km)	16,0	2,5	9,5	13,1	21,3	15,0
% souterrain	100%	70%	100%	74%	42%	100%
Capacité (pphps)	4 700	7 100	9 500	6 000	9 800	9 800
Nombre de stations	20	3	15	17	22	16
Longueur de stations (m)	52	52	52	39	60	60
Diamètre du tunnel (m)						
à 2 voies	6,80	6,40 (tranchée couverte)	6,80	8,15		
à 1 voie	4,50		4,50		4,90	4,90
Coûts (M€)						
Genie civil (yc réseaux)	700	80	350	390		1 590
Coût au Km	44	32	37	30		106
Systèmes + voie	220	80	220	350		270
Coût hors matériel roulant	920	160	570	740	1 470	1 860
Coût au Km hors MR	58	64	60	56	69	124
Matériel roulant	175 ^(*)	50	85	70	160	110
Coût total	1 095	210	655	810	1 630	1 970
Coût au Km total	68^(*)	84	69	62	77	131

(*) Des 56 rames, seules 35 étaient destinées à la ligne B (le reste était destiné à la ligne A), ce qui ramène le coût au Km total à **64 M€**.

Le tableau présente deux systèmes (Val 208 et matériel ANSALDO), chacun sur trois projets construits à des dates différentes et/ou de nature différente (ville, contexte, insertion, etc.). A défaut de conclusions, il permet quelques remarques :

- L'homogénéité du coût au Km hors matériel roulant (sauf pour la Cityringen de Copenhague), entre 56 et 69 M€, n'est qu'apparente. Elle ne s'explique probablement que par l'effet combiné de caractéristiques différentes quant au diamètre des tunnels, à la longueur des stations, au pourcentage de la ligne en souterrain et au contexte local :
 - Les coûts au Km hors matériel roulant du VAL dans des caractéristiques physiques proches (diamètre du tunnel, longueur des station, section souterraine) s'établissent entre 58 et 64 M€,
 - L'écart de plus de 20% entre Brescia et Copenhague M1 et M2 (matériel ANSALDO) est plus difficile à analyser car il intervient avec plus de souterrain à Brescia, mais des stations plus longues à Copenhague ainsi que des conditions géologiques plus difficiles ;
- Les conditions géologiques difficiles de la capitale danoise vont conduire en pratique, selon les prévisions, à un doublement du coût au Km hors matériel roulant pour les lignes M3 et M4 entièrement souterraines.

D'une manière générale, on peut cependant remarquer que :

- Pour ce type de projet et dans des sites urbains de complexité normale, le coût du génie civil représente pratiquement 40 à 60% du coût total de construction (infrastructures, système et matériel roulant) ;
- Le gros œuvre des stations est un élément important du coût du génie civil dans la mesure où, le plus souvent, il est égal ou supérieur à celui des tunnels ;
- L'optimisation des volumes des stations (longueurs des quais, surfaces des zones publiques et des zones techniques) est donc indispensable pour réduire ces coûts de construction.

En conclusion, l'examen des coûts de construction, quand ils sont disponibles de façon assez fiable et détaillée, permet au mieux de tirer quelques observations très parcellaires qu'on ne saurait appliquer sans risque substantiel de se tromper aux caractéristiques d'un nouveau projet en cours de développement.

Pour finir, on trouvera ci-dessous d'autres éléments de coûts très sommaires ceux-ci et dans lesquels nous avons introduit des éléments de dérive par rapport au coût annoncé quand cette dérive semblait probable. On peut constater là aussi l'extrême disparité des résultats que seule une analyse fouillée des différents projets pourrait éventuellement éclairer.

	Coût au Km (hors matériel roulant)	Coût au Km total	Année
DUBAÏ Red Line et Green Line 70 Km – 44 stations – 25% en tunnel	43 M€	55 M€	2007
VANCOUVER Canada Line 19 Km – 16 stations – 47% en tunnel	n/a	68 M€	2007
BARCELONE Linia 9 43 Km – 46 stations – 80% en tunnel	93 M€	100 M€	2007
SINGAPOUR Circle Line 33 Km – 29 stations – 100% en tunnel	n/a	100 M€	2006
SINGAPOUR Northeast Line 20 Km – 16 stations – 100% en tunnel	n/a	115 M€	2003

3.2 COÛTS D'EXPLOITATION

En ce qui concerne les coûts d'exploitation et de maintenance des systèmes en exploitation, il est, en général, difficile de disposer de données fiables sur les coûts réellement constatés pour tel ou tel système dans telle ou telle ville. De plus, les comparaisons directes s'avèrent en général compliquées voire impossibles :

- Les données connues sont difficiles à interpréter car les prestations ou services réellement couverts par ces chiffres sont peu explicités par les réseaux. On note d'ailleurs que ces données sont rares et peu diffusées.

- Les concepts habituellement couverts par ces chiffres varient d'un pays à l'autre :
 - Les dépenses de consommation électrique des réseaux dépendent dans une large mesure du type de contrat de l'opérateur avec son ou ses fournisseurs, ainsi que de la politique d'écrêtage/secours mise en œuvre par l'opérateur pour gérer son contrat (secours par Diesel Alternateur aux heures de pointe, etc...) ;
 - Les dépenses de personnel d'exploitation dépendent très largement
 - du coût de la main d'œuvre et de ces conditions d'utilisation dans le contexte particulier des transports collectifs
 - de la politique de l'entreprise en matière de présence de personnel en station et en ligne afin d' « humaniser » les lignes et/ou de lutter contre la fraude. Ceci est particulièrement vrai pour les métros automatiques ;
 - Les dépenses liées à la maintenance dépendent quant à elles :
 - du coût de la main d'œuvre ou du marché (en cas d'externalisation),
 - des politiques de maintenance mises en place pour les différents équipements et éléments d'infrastructure : niveau d'exigence, externalisation, etc,
 - de la mise en œuvre de la maintenance du matériel roulant sur la base des préconisations du constructeur : parc de réserve, externalisation, etc.

A ce niveau de l'étude, nous avons constaté que, sur les systèmes inventoriés, il n'existait aucune base de coûts fiable et/ou suffisamment détaillée pour en tirer des conclusions significatives et utilisables. Nous proposons, en conséquence, de procéder à une collecte de données aussi exhaustive que possible auprès des constructeurs (voir 4.3 ci-après) sur les consommations électriques et sur la maintenance des différents matériels présent sur le marché. Ceci permettra d'alimenter l'évaluation des coûts d'exploitation pour le projet Arc Express telle qu'elle est prévue dans la deuxième phase de l'étude.

3.3 RISQUES ÉVENTUELS

L'objectif de cette partie de l'analyse est de pointer de façon qualitative certains risques associés a priori à chacun des systèmes. Il existe trois sortes de risques en l'occurrence :

- Les risques industriels sur les systèmes,
- Les risques liés à l'insertion plus ou moins facile dans l'environnement de chacun des systèmes,
- Les risques liés à la plus ou moins grande facilité des systèmes à augmenter leur capacité de transport (réserve de capacité et évolutions possibles).

Pour ce qui est des risques industriels, les résultats de l'inventaire montrent qu'il existe de nombreux systèmes éprouvés tant du point de vue de l'utilisation d'une même technologie sur des sites différents que sur la durée de ces utilisations. Les risques industriels se résument donc principalement aux :

- Risques liés à des stades de développement peu avancés de certains systèmes ;
- Risque (limités) liés à la compatibilité/adaptabilité matériel/automatismes, à l'interchangeabilité des sous-systèmes et aux interfaces avec des sous-systèmes existants (voir section 2.3 du présent document) ;

- Risque d'obsolescence technologique pour un système déjà un peu ancien dont le marché ne se serait pas développé.

Les risques liés à l'insertion font l'objet de différentes études en particulier sur le plan de l'urbanisme et de l'intermodalité. L'insertion de stations type fera l'objet d'une première approche dans le cadre de la phase 2 de la présente étude. Enfin, la disponibilité de terrains susceptibles d'accueillir le (ou les) garage(s)/atelier(s) reste un élément clé et donc un facteur de risque.

Les risques liés à la capacité d'évolution du système sont abordés dans la section 1.5.1 de ce rapport sous l'angle de la notion de réserve de capacité.

4. DÉFINITION DE SYSTÈMES CIBLES

4.1 OBJECTIF

Les informations et les données recueillis dans le cadre de l'inventaire doivent permettre de définir des systèmes de transport cibles pour le projet Arc Express.

Il ne s'agit pas, bien entendu, de choisir à ce stade tel ou tel système de transport. Il s'agit en fait de caractériser différents scénarios sur la base de paramètres physiques et techniques réalistes avec pour principal objectif de :

- Fournir des données d'entrée pour les études d'insertion de tracés.

Pour pouvoir :

- Évaluer et comparer l'impact de différents scénarios de systèmes de transport sur le coût des infrastructures.

En effet, face à différents scénarios d'insertion, de maillage et d'implantation de stations, il faut pouvoir s'appuyer sur une définition physique du ou des systèmes envisagés en section courante et en station pour élaborer une évaluation solide.

4.2 APPROCHE PROPOSÉE

4.2.1 Définition

Les facteurs dimensionnant pour le coût des infrastructures peuvent être répartis en deux catégories :

- Le tracé :
 - ✓ Insertion (aérien / souterrain)
 - ✓ Points de maillage
 - ✓ Stations nouvelles
- Les dimensions physique et techniques
 - ✓ Diamètre du tunnel,
 - ✓ Longueur des quais
 - ✓ Paramètres tracés (plan/profil)
 - ✓ Locaux techniques système

Le tracé fait l'objet de différentes études en cours relatives aux enjeux urbains et de transport, à l'intermodalité, aux points de maillage, etc. Ces études permettront d'apprécier les enjeux de positionnement physique du projet Arc Express en termes de coûts, de développement urbain, de service aux voyageurs franciliens, etc. Elles conduiront à la élaboration de scénarios qui serviront de base à « l'étude d'insertion des tracés » qui démarre.

La définition, sous forme de scénarios contrastés, des dimensions physique et techniques du projet constitue une donnée d'entrée indispensable de « l'étude d'insertion des tracés ». La définition de scénarios de dimensionnement est, pour sa part, directement liée à :

- La capacité à mettre, c'est-à-dire les caractéristiques du trafic attendu ;
- Les caractéristiques du matériel roulant telles qu'elles découlent du « catalogue » issu de l'inventaire.

Ce sont ces scénarios contrastés de dimensionnement physique et techniques du projet que nous proposons d'appeler « systèmes cibles » pour les besoins de l'étude.

4.2.2 Données d'entrée

Les données d'entrée qui permettent la définition des scénarios sont donc les suivantes :

- Capacité de la ligne (*caractéristiques du trafic attendu*) :
 - Trafic nominal (à l'ouverture),
 - Trafic à long terme (2030) ;
- Caractéristiques du matériel roulant :
 - Familles caractérisées par la largeur des trains,
 - Caractéristiques constatées des matériels disponibles dans chaque famille (*longueur des véhicules, caractéristiques techniques réelles, etc.*).

Les caractéristiques des trafics attendus sur les différents arcs ne sont pas connues à l'heure où nous élaborons ce document.

Les familles de matériel roulant disponibles s'établissent comme indiqué dans le tableau ci-après.

Familles de matériel par classe de largeur

2,00 – 2,10 m	2,40 – 2,50 m	2,60 – 2,70 m	2,80 – 2,90 m	≥ 3,00 m
SIEMENS (VAL 208)	ALSTOM (Paris, Lausanne) BOMBARDIER (Taipei)	ANSALDO (Copenhague, Brescia) ALSTOM (Métropolis) BOMBARDIER (Vancouver, Londres) SIEMENS (CityVal)	ALSTOM (Métropolis) MITSUBISHI (Dubai) SIEMENS (CityVal)	ALSTOM (Métropolis) BOMBARDIER (New York JFK, Yongin) ROTEM (Sao Paulo, Vancouver, Séoul)
Largeur ≥ 2,40m (construit depuis 2000)	10%	60%		30%

Si l'on fait abstraction des matériels de petit gabarit (VAL 208), la répartition des systèmes construits depuis 2000 ou en cours de construction par famille de largeur montre une concentration significative (60%) dans la tranche 2,60 à 2,90 m.

Cette classification est faite sur la base des systèmes inventoriés. Elle doit donc être affinée et complétée au travers de contacts avec les constructeurs.

Les caractéristiques de matériels existants en matière de longueur de caisse se déclinent comme suit

- Soit la longueur des véhicules est relativement adaptable, mais cette adaptabilité est limitée par :
 - les contraintes liées à la structure de la caisse,
 - les contraintes liées aux équipements embarqués ;
- Soit la longueur des véhicules est fixe :
 - de 11m à 18m pour les matériels européens,
 - jusqu'à 20m pour les matériels asiatiques.

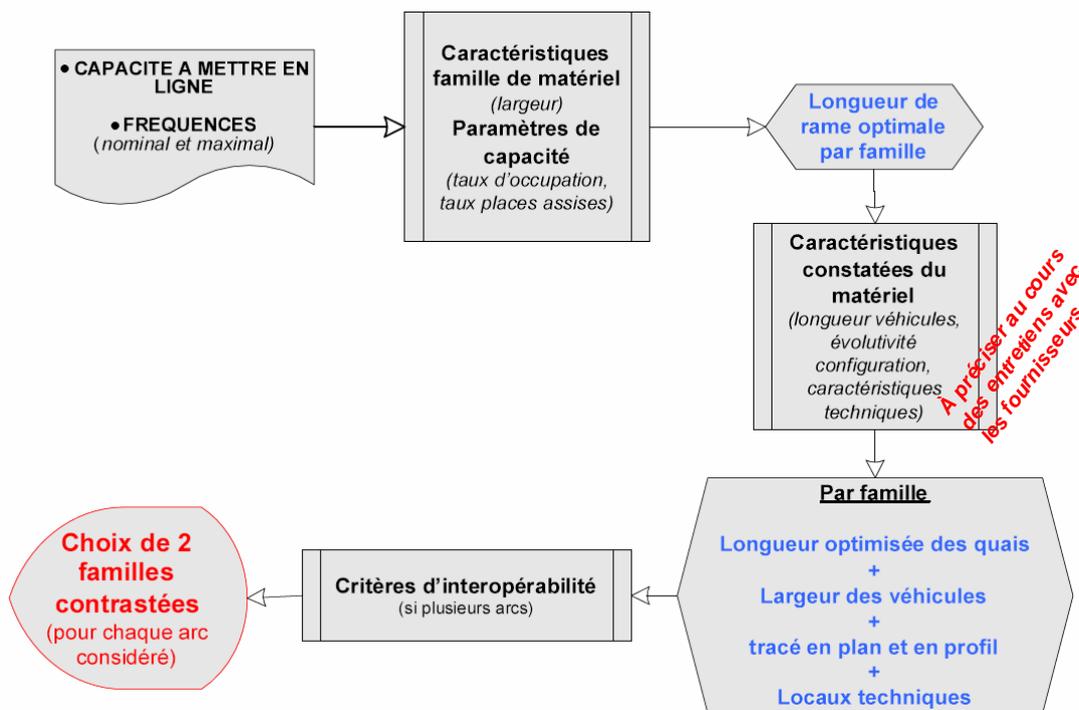
Une autre donnée d'entrée est à collecter auprès des constructeurs : l'évolutivité de la configuration des rames. Il s'agit d'un élément clé dans la définition d'une stratégie en matière de réserve de capacité :

- Nombre minimum/maximum de véhicules par rame ;
- Scénario d'intégration d'un ou plusieurs véhicules supplémentaires ;
- Sensibilité aux évolutions technologiques sur la durée.

Enfin, il convient de se faire une idée assez précise, toujours auprès des constructeurs et fournisseurs et sur la base de l'existant, du volume occupé par les locaux techniques dans les stations (voir section 2.3.2 du présent document).

4.2.3 Méthodologie

Sur la base des éléments développés dans les sections précédentes, le schéma ci-dessous résume l'approche que nous proposons pour aboutir au choix de deux systèmes cibles par arc considéré.



La meilleure manière d'expliciter cette approche est de l'illustrer par un exemple. Il s'agit bien entendu d'un exemple fictif mais réaliste et raisonnable quant aux hypothèses utilisées.

La première étape consiste à calculer, pour chaque famille de largeur et par tranche de capacité à mettre en ligne, la longueur optimale (sans contraintes sur la longueur des véhicules) des rames.

Ce calcul nécessite évidemment des hypothèses quant au taux de places assises et au taux d'occupation pour les voyageurs debout. Il doit également être fait pour différents intervalles d'exploitation, ici avec un minimum à 90 secondes qui est le plus court.

Ce premier calcul permet d'identifier, sur la base des capacités nominale (à l'ouverture) et à long terme désirées, les longueurs de quai à prendre en considération (voir tableau ci-après).

Longueur optimale des rames en fonction de la capacité mise en ligne

Capacité nominale : 10 000 Taux de places assises : 25%
Capacité long terme : 20 000 Taux occupation places debout (voy./m²) : 4,0

Capacité (voy./h)	VAL 208			L 240-250			L 260-270			L 280-290			L ≥ 300		
	180s	120s	90 s	180s	120s	90 s	180s	120s	90 s	180s	120s	90 s	180s	120s	90 s
8 000		52,0	52,0	50,0	33,0	25,0	46,0	31,0	23,0	43,0	29,0	22,0	39,0	26,0	20,0
9 000		52,0	52,0	56,0	38,0	28,0	52,0	35,0	26,0	48,0	32,0	24,0	44,0	29,0	22,0
10 000			52,0	62,0	42,0	31,0	58,0	39,0	29,0	54,0	36,0	27,0	49,0	33,0	25,0
11 000			52,0	68,0	46,0	34,0	63,0	42,0	32,0	59,0	39,0	30,0	53,0	36,0	27,0
12 000			52,0	75,0	50,0	38,0	69,0	46,0	35,0	64,0	43,0	32,0	58,0	39,0	29,0
19 000				118,0	79,0	59,0	109,0	73,0	55,0	101,0	68,0	51,0	92,0	61,0	46,0
20 000				124,0	83,0	62,0	115,0	77,0	58,0	107,0	71,0	54,0	97,0	65,0	49,0
21 000				130,0	87,0	65,0	120,0	80,0	60,0	112,0	75,0	56,0	101,0	68,0	51,0
22 000				136,0	91,0	68,0	126,0	84,0	63,0	117,0	78,0	59,0	106,0	71,0	53,0
23 000				143,0	95,0	72,0	132,0	88,0	66,0	123,0	82,0	62,0	111,0	74,0	56,0
24 000				149,0	99,0	75,0	138,0	92,0	69,0	128,0	85,0	64,0	116,0	77,0	58,0

Sur la base des résultats de la première étape, une deuxième étape consiste à leur appliquer les différentes contraintes issues des caractéristiques constatées des matériels existants. Ces contraintes sont obtenues au travers d'interviews avec les différents constructeurs et fournisseurs. Elles portent sur :

- les largeurs et longueurs réelles des véhicules,
- la capacité réelle des véhicules.

Cette deuxième étape permet de déduire une longueur de quai résultante, puis optimisée pour chaque famille de largeur qui tient compte des résultats de la première étape, des contraintes et d'une stratégie en termes de réserve de capacité.

Longueur de quai optimisée

Capacité nominale : 10 000 Places assises : 25%
Capacité long terme : 20 000 Places debout (voy./m²) : 4,0

	VAL 208	L 240-250	L 260-270	L 280-290	L ≥ 300
Longueur de quai optimale		62,00	58,00	54,00	49,00
Longueurs des véhicules (m)					
Constructeur 1		15,00	15,00	17,00	18,00
			17,00	19,00	20,00
			19,00	20,00	23,00
Constructeur 2	26,00		11,20	11,20	
Constructeur 3			13,00		
Constructeur 4			17,30	17,30	20,00
Longueur de quai résultante		62,00	70,00	57,00	60,00
LONGUEUR DE QUAI OPTIMISÉE		60,00	65,00	57,00	60,00

SYSTEMES CIBLES PROPOSÉS

La dernière étape consiste à choisir deux familles de largeur qui produisent des caractéristiques contrastées quant au diamètre du tunnel et à la longueur des quais. Ce choix peut intégrer des paramètres d'interopérabilité entre les différents arcs (voir tableau ci-avant).

4.3 ENTRETIEN AVEC LES INDUSTRIELS

Si l'on veut se situer dans une perspective réaliste vis-à-vis de la définition de systèmes cibles, il est indispensable d'acquérir des données fiables sur les matériels et équipements disponibles auprès des industriels.

Il entre de fait dans le cadre de cette étude d'organiser des entrevues avec différents industriels présents sur le marché. Ces entrevues seront utilisées pour :

- Soumettre aux constructeurs et fournisseurs un questionnaire adapté (à nos besoins et aux produits qu'ils proposent) ;
- Permettre aux constructeurs et fournisseurs de présenter leurs différents produits ;
- Affiner la collecte de données relatives au matériels et équipements au travers d'une discussion basée sur les réponses au questionnaire et la présentation.

Comme explicité dans les sections précédentes de ce document, les données que nous cherchons à collecter ou à affiner sont les suivantes :

- Caractéristiques réelles (c'est-à-dire constatées) du matériel et des équipements :
 - Largeur, hauteur et gabarit dynamique,
 - Longueur des véhicules,
 - Capacité des véhicules,
 - Contraintes sur le tracé en plan et en profil (pente maximale, rayon minimal, etc.),
 - Surface des locaux techniques système,
 - Conception, dimensionnement et organisation des gares et ateliers ;
- Caractéristiques techniques principales du matériel :
 - Type et pose de voie (fer, pneu, guidage central),
 - Alimentation électrique (3ème rail, caténaire),
 - Évolutivité de la composition des rames, (contraintes liées à l'augmentation de capacité),
 - Accélération / freinage,
 - Poids,
 - Motorisation, puissance, etc ;
- Caractéristiques principales des automatismes :
 - Fonctions assurées,
 - Performances,
 - Modularité,
 - Gestion des interfaces avec les autres sous-systèmes,
 - Compatibilité,
 - Interchangeabilité des sous-systèmes,

- Caractéristiques des garages / ateliers :
 - Politique générale de maintenance et sous-traitances,
 - Voies d'essais destinées à tester les trains et leurs éventuels automatismes avant de les injecter en ligne,
 - Gestion automatique des trains dans le garage/atelier,
 - Système de levage par vérins à la place de fosses de visites,
 - Machine à laver,
 - Fosse à tour pour les matériels sur fer,
 - Locaux spécifiques de stockage.
- Caractéristiques relatives aux coûts d'exploitation :
 - Consommation d'énergie liée au matériel roulant et aux systèmes,
 - Politique de maintenance du matériel roulant, des automatismes et des sous-systèmes liés,
 - Etc.

La conjonction et la complémentarité des données collectées au travers de l'inventaire et de ces entrevues permettront de constituer une base solide susceptible d'alimenter les études techniques, en particulier les études d'insertion des tracés. Elles permettront par ailleurs de développer une approche réaliste des coûts d'exploitation dans le contexte de l'Île-de-France dans la deuxième partie de l'étude.

ANNEXE 1

- ☒ Inventaire métros automatiques – Réserve de capacité

ANNEXE 2

- ☒ Fiches matériel roulant