

## La mobilisation d'investissements lourds pour un transport collectif de qualité

séparer les TC sur voirie des TC avec site propre ou infrastructure et matériel dédié  
transport de masse: objectifs de structuration de la ville et de capacité

### 1 Transport de masse: diverses options possibles

#### 1.1 Les éléments constitutants d'une ligne de TC et capacité

Il existe une grande diversité de modes de transport public, métro, BRT<sup>1</sup>, tramway,... répondant à des objectifs de capacité, de niveau de service, de coût, d'insertion dans l'environnement,... Malgré l'utilisation de termes génériques, variables d'ailleurs dans leur usage selon les régions ou les pays<sup>2</sup>, il existe une forme de continuité entre les différents systèmes, chacun étant l'assemblage de différents éléments:

##### 1.1.1 La ligne:

Elle comprend les superstructures: voie et système de guidage, signalisation et alimentation électrique et les **infrastructures de la plateforme en remblais, déblais**, passages à niveau, inférieurs et supérieurs, tunnels, viaducs...

On distingue essentiellement la conduite avec signalisation (métro et trains) et la conduite à vue (bus, trolley et tramway). La conduite à vue permet éventuellement une insertion dans la circulation et notamment d'avoir des croisements à niveau avec de simples feux de signalisation, donc une meilleure capacité des voies traversées.

L'insertion dans la circulation peut réduire **la vitesse et donc la** fréquence des passages possibles **et ainsi la capacité de la ligne**.

Les systèmes guidés nécessitent des emprises plus faibles que les systèmes non guidés (**d'au moins un mètre pour une plateforme à deux voies et à vitesse faible**).

##### 1.1.2 Les stations

L'accès aux véhicules de transport se fait à travers des stations, pouvant aller du simple panneau indiquant l'arrêt à la station de métro souterraine ou au centre d'échange. Le fait d'intégrer dans la station toutes les fonctions d'achat de titre de transport et de contrôle d'accès permet d'améliorer le taux d'échange et donc la capacité du système.

Le BRT se distingue en bonne partie des systèmes de bus habituels par le fait qu'il utilise des stations fermées comme les métros avec accès sans marche et par toutes les portes dans les rames de bus.

---

<sup>1</sup> BRT : l'appellation française donnée par le CERTU est BHNS Bus à Haut Niveau de Service

<sup>2</sup> À titre d'exemple, en Corée, est considéré comme métro léger un système ferroviaire ayant un gabarit inférieur au gabarit ferroviaire standard, ce qui inclut des systèmes comme les métros automatiques légers type VAL, les tramways modernes, mais aussi le métro parisien.

### 1.1.3 Le matériel roulant

On distingue essentiellement les matériels routiers, i.e. les matériels habilités à circuler sur les voies routières et soumis au code de la route, bus, cars et trolleys, et les matériels non routiers sur fer ou sur pneu guidés (tramway, VAL, métro, monorail,...).

Les matériels routiers ont une largeur d'environ 2,5m et une longueur allant de 5m pour le minibus à 24,5m pour le mégabus à 3 caisses. (un projet de prototype 4 caisses serait en préparation chez VOLVO à Curitiba).

Les matériels non routiers ont des largeurs allant de 2m (tramway de Saint Étienne) à 3,6m . La longueur des trains peut aller jusqu'à 220m (15 x 20 = 300 mètres au Japon) et la capacité d'un train jusqu'à 2000 passagers (3000 navetteurs à Tokyo).

Parmi les matériels non routiers, on peut distinguer les matériels ferroviaires à l'écartement et au gabarit général ferroviaire du pays. L'usage du gabarit standard permet de réserver la possibilité d'interconnexions entre lignes de tramway, de métro et de banlieue. C'est le choix qui a été fait, dans l'ancienne URSS pour des raisons militaires, en Corée et au Japon pour une large partie des lignes de métro.

### 1.1.4 La capacité

La capacité d'un mode de transport résulte à la fois de la capacité unitaire des véhicules et de la cadence à laquelle on peut les faire se succéder sur l'infrastructure qui les accueille. Cette capacité s'exprime en passagers par heure et par sens:

$\text{longueur} \times \text{largeur} \times (\text{part de surface affectée aux places assises} \times \text{nombre de places assises/m}^2 + \text{part de surface affectée aux places debout} \times \text{nombre de places debout/m}^2) \times \text{fréquence maximale}$

La fréquence dépend de l'intervalle minimum auquel on peut parvenir:

- en fonction des systèmes de contrôle existant, du système de gestion du trafic
- du temps d'embarquement et de débarquement des passagers, notamment aux arrêts les plus fréquentés, lui même lié au nombre et à la largeur des portes, à l'absence d'embarquement pour aller du quai à la voiture
- du système de signalisation
- du degré de ségrégation par rapport au trafic général

Nota: la question de la capacité est à relier à la question de la conception générale du réseau: plusieurs lignes de tramway peuvent avoir la même capacité qu'une ligne de métro pour un coût équivalent.

## 1.2 Classés du plus léger au plus lourd

### 1.2.1 Les transports collectifs motorisés de petite capacité

On regroupe sous ce vocable des modes de transport très variés , allant du minibus au système de motos - taxis, sans oublier les tricycles motorisés indiens autrement appelés « Rickshaws ».

Ces véhicules ont une capacité nominale très réduite, allant de 1 à 2 personnes transportées

(passagers) pour les motos -taxis à une vingtaine pour les minibus. La capacité de ces véhicules est surmaximisée, puisque dans une automobile standard qui accueille normalement 5 personnes maximum, on peut trouver couramment jusqu'à 6 ou 7 personnes adultes. Pareillement, les magabanas guinéens qui sont généralement des véhicules Toyota, de modèle Hiace, initialement conçus pour 8 passagers, sont « réaménagés » de manière à en transporter environ 21.

Les coûts d'investissements réduits de ces véhicules expliquent largement leur large diffusion, entre 3000 et 4500 euros pour une automobile de type Toyota d'occasion en Afrique de l'Ouest. Il est possible de trouver des tarifs encore moins chers pour des véhicules moins prisés. Les minibus Toyota de modèle Hiace se vendent quant à eux de 7500 à 9000 euros d'occasion.<sup>3</sup>



Figure 1 - Tuk-tuk à Vientiane -Laos



Figure 2 - Xe-om (moto-taxi) en attente à Hanoi-Vietnam



Figure 3 - Magbanah à Conakry (minibus) -Guinée



Figure 4 - Taxi jaune et noir, Mumbai

<sup>3</sup> « Made in JAPAN », *Jeune Afrique*, 28 octobre 2003



Figure 5 - Jeepney (taxicollectif), Manille



Figure 6 - Grand taxi (collectif)-Maroc

Ce type de transport collectif, comme le bus se prête bien à une exploitation au risques et périls des entrepreneurs.

### 1.2.2 Autobus

L'autobus, qui est un système flexible, adaptable à une infinité de contextes, dispose d'une grande gamme de modèles qui va du minibus de 5 m de long jusqu'au Mégabus de 24.5 m.



	Autobus	
	standard	articulé
Nombre de caisses	1	2
Longueur	12 m	18 m
Largeur	2.50 à 2.55 m	
Hauteur	2.9 m	
Accélération	1 m/s <sup>2</sup>	
Vitesse maximale	65 – 90 km/h	
Hauteur par rapport au sol	34 cm	
Traction	Thermique, gaz	
Durée de vie	10/15 ans	
Nombre de places total (4 p/m <sup>2</sup> )	70, dont 40 assises	110, dont 50 assises
Nombre de places total (7 p/m <sup>2</sup> )	90	170

Tableau 1 - Les caractéristiques du matériel roulant bus



Les autobus circulent en site non protégé et sont insérés dans la circulation automobile. Dans ce cadre, les bus peuvent difficilement offrir des intervalles inférieurs à 4 minutes, compte tenu du risque d'irrégularité et de formation de « trains de bus ».

Il est possible ensuite de réaliser un aménagement en voie réservée et un système de priorités aux carrefours. Ces aménagements peuvent se faire sur tout l'itinéraire de la ligne ou sur des sections, par exemple au niveau des carrefours ou aux sections qui connaissent une circulation dense.

La conception du site propre dépend fortement du niveau de qualité de la gestion du trafic : équipement en feux, respect du code de la route et des couloirs réservés,...

Il faut noter aussi qu'un couloir bus ou un site propre n'est nécessaire que pour éviter les encombrements, on peut donc combiner des actions de gestion du trafic pour localiser les encombrements de manière à protéger la circulation des bus et la création de couloirs.

Le bus en voie réservée permet de réduire cet intervalle à 1-2 minutes et permet d'atteindre des vitesses commerciales plus élevées.

Au niveau de l'alimentation en énergie, un large choix de moteurs et de transmissions, ainsi que de modes de propulsion alternatifs sont disponibles.

Pour les aménagements en voie réservée, la largeur de la plate-forme en alignement est déterminée par la vitesse de circulation, par le niveau de trafic et par la nature du séparateur (franchissable ou non). Ainsi, en zone urbaine, pour une vitesse de circulation de 50 – 60 km/h, l'autobus nécessite généralement un site propre de :

- 7 m en voie double (2 sens confondus), soit environ 14 m minimum pour un site propre à 2 x 2 voies,
- 3,50 m en voie unique.

Les bus ne sont pas réversibles, il convient d'aménager **un espace de retournement en boucle** en bout de ligne.

Les bus largement utilisés dans de nombreux réseaux de par le monde, ne présentent pas de risques technologiques particuliers. Les bus sont fiables et les modalités d'exploitation sont connues.

Les coûts d'investissement des voies réservées bus sont très variables, mais offrent l'avantage de présenter des coûts d'investissement se situant en deçà des coûts observés pour les systèmes ferroviaires (si l'on tient compte du coût de plateforme pour les systèmes d'autobus, le coût sera proportionnel au nombre d'autobus et à la charge à l'essieu fréquentant la chaussée pendant 30 ans par exemple et donc plus cher à Bogota que pour une ligne fréquentée par quelques autobus à l'heure : le coût de possession du système ferré sera moins cher pour les fortes capacités que le système routier simplement en raison du contact roue rail dont le frottement est 4 fois plus faible que le contact pneu-chaussée). Ils dépendent surtout de la longueur de voies réservées, de la nature et de la qualité des aménagements, des opérations d'accompagnement choisies.

Le coût d'un bus neuf varie également mais on peut donner un ordre de grandeur suivant pour des bus adaptés aux pays en voie de développement : plancher haut, robustesse...

Pour un bus de 12 mètres, il faut compter 130 000 \$ et pour un bus de 18 mètres 200 000 \$. (ce prix me paraît très faible à 1€ = 1,47 \$ je pense plutôt à 300 000 à 400 000 \$ le bus articulé diesel de Bogota.

### 1.2.3 Autobus en site propre

#### Les systèmes à guidage immatériel ou bus guidés

Ce sont des systèmes de type routier guidés par un guidage immatériel qui peut être à lecture optique ou à détection par boucle magnétique. Il ciblait à l'origine le créneau des villes moyennes. Les deux systèmes sont innovants, mais présentent des risques technologiques réels. Ils ont un coût intermédiaire entre le tramway ferroviaire et le bus en site propre.

Il existe uniquement deux constructeurs sur le marché, Irisbus et APTS commercialisant respectivement le Cavis à Rouen et le Phileas à EinDhoven (Pays-Bas).



Figure 7 - Cavis, Rouen



Figure 8 - Phileas, EinDhoven

DESCRIPTIF	Cavis	Phileas	
		18 mètres	24 mètres
Traction	Thermique ou électrique	Thermique	
Type de guidage	Optique	Magnétique	
Nombre de caisses	2	2	3
Longueur	18,50 m	18 m	24 m
Largeur / Hauteur	2,55 m / 3,22 m	2,54 m / 3,12 m	
Monotrace	Non	Oui	
Durée de vie	20 ans	20 ans	
Nombre de places total (4 p/m²) dont places assises	110 dont 30	90 dont 30	120 dont 40
Débit horaire sur la base d'une fréquence de 4 min par sens - à 4 p/m²	1650	1350	1800

Tableau 2 - Comparaison du Cavis et du Phileas

#### Les autobus en site propre et le trolleybus

Les autobus en site propre sont des autobus pour lesquels des couloirs spécifiques sont dédiés. Leur efficacité est très variable et dépend fortement du degré de priorité accordé aux carrefours, selon le niveau d'isolement du site propre par rapport à la circulation générale.

Ainsi la capacité du système peut varier de 2 000 pphpd (bus en trafic mixte) à 14 000 pphpd (BRT à 2x1 voie) jusque 36 000 pphpd (BRT 2\*2 voies) et la vitesse commerciale moyenne de 12 km/h (bus en trafic mixte) à 25-30 km/h (BRT à 2x1 voie/ 2\*2 voies).

Le trolleybus roule sur pneumatiques, comme l'autobus, mais il est propulsé par un moteur électrique, comme le tramway. Il est alimenté par deux lignes de contact aériennes appelées aussi bifilaires. Le système de captage du courant est issu de celui utilisé par les tramways. Le trolleybus moderne, relooké, à plancher bas et plus confortable, refait son apparition depuis peu : par exemple, le Cristalis à Lyon.

Le coût d'investissement en site propre intégral est de l'ordre de 2,5 à 6 millions d'euros par km d'autobus en site propre et de 4,5 à 9 millions d'euros par km pour le trolleybus.



Figure 9 - Trolleybus moderne, Lyon

DESCRIPTIF	Autobus			Trolleybus nouvelle génération	
	Standard	Articulé	Bi-articulé	Standard	Articulé
Nombre de caisses	1	2	3	1	2
Longueur	12 m	18 m	24 m	12 m	18 m
Largeur	2,50 à 2,55 m			2,55 m	
Hauteur	2,9 m			2,9 m	
Traction	Thermique, gaz, aquazole, ....			Electrique	
Durée de vie	10-15 ans			20 ans	
Nombre de places total (4p/m <sup>2</sup> ) dont places assises	80 dont 30	120 dont 50	160 dont 70	70 dont 35	100 à 110 dont 35
Débit horaire sur la base d'une fréquence de 2 minutes à 4 p/m <sup>2</sup>	2400	3600	4800	2100	3300

Tableau 3 - Comparaison de l'autobus en site propre et du trolleybus

Les options d'insertion urbaine des autobus en site propre, comme celles des tramways, peuvent être latérales, bilatérales, axiales ou en site propre en voie unique avec sens alterné.

#### **1.2.4 Bus Rapid Transit (BRT):**

Le système BRT est plus élaboré qu'un simple autobus en site propre. C'est un concept qui est apparu en Amérique Latine. Le principe est simple : avec des bus, réaliser un système de transport public capacitaire dont la capacité est proche des modes lourds ferroviaires. C'est la notion de système qui est mise en avant plus que de matériel roulant.

Pour atteindre cet objectif, les caractéristiques suivantes sont appliquées au système :

- voies complètement réservées : 2 x 1 voie ou 2 x 2 voies
- forte fréquence des bus
- vitesse commerciale élevée.

Le concept est ensuite modulable à l'infini, ce qui fait d'ailleurs sa pertinence. Peuvent ensuite être intégrés un système billettique performant où le paiement se fait au niveau de l'accès aux stations, un système centralisé pour l'exploitation du site propre, la mise en place de portes palières aux stations pour améliorer la charge/décharge en station.

La capacité peut aller à jusqu'à 15 000 passagers heure/sens dans une configuration 2 x 1 voie comme à Curitiba au Brésil et de 35 000 passagers heure/sens pour une exploitation en 2x2 voies comme pour le Transmilenio de Bogotá.

Cet exemple est le concept poussé à l'extrême. Une petite description du système est présentée ci-dessous.

Les coûts d'investissement varient énormément selon la forme du projet. Pour donner un ordre de grandeur, les coûts d'investissement pour différents projets de BRT peuvent ainsi aller de 1 M€/km à plus de 5 M€/km, hors matériel roulant. À Bogotá, le coût du Transmilenio a été estimé à 213 M€ pour 41 km soit 5.2 M€ par km pour un site propre bus à double sens hors matériel roulant.



La mairie de Bogotá tient un discours politique fort en matière de responsabilité institutionnelle, citoyenne et de reconquête urbaine. Elle s'est fixé un objectif d'égalité dans le domaine des transports, de l'espace public et de l'éducation.

#### **Le système Transmilenio en 10 points clefs :**

1. Exploitation exclusivement en bus articulés de 18 mètres (« bus rouges » capacité de 160 passagers)
2. Sites propres bus uniquement (2x2 voies), dédiés à 2 types de missions express et omnibus, de manière à favoriser les performances de vitesse commerciale,
3. Les stations sont physiquement fermées (distance moyenne d'interstation de 500 mètres) et existence de pôles de rabattement (aux terminus et en ligne),
4. Préparation systématique par contrôle d'accès aux stations (tourniquets et cartes sans contact),
5. Accessibilité totale aux personnes à mobilité réduite et déficients visuels,
6. Existence de lignes de bus de rabattement (« bus verts », véhicules de capacité de 40 à 80 passagers) en correspondance et en intégration tarifaire avec les bus rouges,
7. Chaque véhicule est connecté au poste de contrôle et de régulation par GPS,
8. Les concessions d'exploitation des corridors Transmilenio sont attribuées à des investisseurs domestiques et internationaux ; l'exploitation des lignes de bus de rabattement est concédée à des compagnies de transport préalablement existantes,
9. Rapidité d'exécution, réalisation de la première tranche en 2 ans, les mêmes délais devraient être tenus pour la seconde,
10. Volonté sociale forte de la Mairie qui a largement porté le projet et insisté sur le concept de rabattement, d'accessibilité et sur la création d'emplois locaux (entretien, maintenance...).



#### **Les stations**

Les stations sont axiales et disposent de plusieurs positions d'arrêt (jusqu'à 6 par sens pour les plus importantes d'entres-elles). Ainsi, la longueur des stations peut avoisiner 150 mètres. Intégralement fermées, elles sont équipées de portes palières et de tourniquets d'accès.

#### **Consommation d'espace**

La largeur d'emprise minimale nécessaire au système est de 19 mètres au droit des stations (2 x 6,5 m de voies, 5 m de station et séparateurs extérieurs). Cette valeur est souvent valable en section courante où l'espace central de séparation conserve la largeur de la station. L'importance de ces valeurs est une contrainte d'insertion forte.

#### **Billettique**

La vente de titres de transports est réalisée en guichet à chaque station. Il s'agit de cartes sans contact.

#### **Capacité du système**

La capacité théorique du système est annoncée à 45 000 passagers/sens/heure, ce qui correspond à 280 passages bus à l'heure avec une capacité de véhicule de 160 passagers soit un ratio d'occupation de 6 personnes au m<sup>2</sup> pour les passagers debout. A 110 passagers par véhicule, la capacité théorique serait de 31 000 passagers/sens/heure.

Le réseau de bus de Curitiba est exclusivement intégré. Il est composé de lignes BRT express ou omnibus, de lignes de rabattement et de lignes périurbaines. On dénombre 221 stations-tubes, 340 lignes et 60 km de site propre pour un trafic d'1,9 millions passagers/jour. La vitesse commerciale BRT avoisine les 25 km/h (omnibus) et sur le tronçon le plus chargé on dénombre 14 000 pphpd, avec une période de 75s.



Stations en tube avec prépaiement

### 1.2.5 Tramway ferroviaire moderne

Le tramway ferroviaire moderne est un système guidé par rail, et peut circuler en voie mixte ou séparée.

Il est le système ferroviaire urbain le plus développé en France et en Europe sur des agglomérations de plus de 250 000 habitants, mais est également présent dans les villes de moins de 100 000 habitants, en Suisse et en Allemagne par exemple. En Allemagne et en Suisse, il sert aussi de desserte périurbaine.

Il est développé par de nombreux constructeurs, tels que Alstom, Bombardier, Siemens, Ansaldo-Breda.

C'est un système qui trouve généralement son optimum économique sur des lignes de 10 à 15 km dans un milieu urbain dense et sur des lignes de 50 à 60 km pour les extensions en zone périurbaine. L'alimentation électrique se fait le plus couramment par caténaire, mais elle peut également se faire par le sol (APS<sup>4</sup>) par l'intermédiaire d'un 3<sup>ème</sup> rail, comme à Bordeaux ou encore par batteries sur des sections localisées, comme à Nice (mise en service prévue fin 2007).

Sa capacité oscille entre 2000 et 8000 pphpd (4 passagers par m<sup>2</sup>), selon la longueur des rames, variant de 20 à 60 m pour une vitesse commerciale entre 18 et 25 km/h en moyenne, pouvant monter à 35 km/h (tramway périurbains ou réutilisant des emprises ferroviaires).

Le coût d'investissement est de l'ordre de 15 à 30 millions d'euros par km en zone urbaine dense.

En zone périurbaine, on peut descendre à 4 M€/km hors matériel roulant (celui-ci étant lié au type de fréquence retenue).



Figure 10 - Tramway de Nantes, France



Figure 11 - Tramway de Lyon, France

<sup>4</sup> APS :Alimentation par le sol

Caractéristiques		Infrastructures	
Fiabilité	forte	Véhicule Monotrace	Oui
Système de guidage	Rails	Emprise en section courante	5,60 à 6,30 m
Longueur du véhicule	20 à 60 m	Emprise en courbe de 25 m	6,9 à 7,7 m
Largeur du véhicule	2,20 à 2,65 m, allant jusqu'à plus de 3 m en ex-URSS	Rayon minimum en tracé	25 m
Charge max à l'essieu en charge normale	9 t	Pente maximum	6-8 %
Type de traction	Électrique 750 V en zone urbaine	Choix de revêtement	Varié
Vitesse maximale	70 km/h ou plus en zone périurbaine	<b>Coûts</b>	
Plancher bas	Oui	Investissement total moyen au km (hors ouvrage d'art)	15-30 M €, descendant à 4M€ en zone périurbaine
Confort voyageur	Bon	Prix d'un véhicule	1,7 à 3M€
Nombre total de places (4p/m²)	160 à 350	Prix d'un véhicule ramené à la place	11 000€
Gamme de trafic correspondante (en voyageur / sens / heure)	2000 à 8000	Coût d'exploitation au km parcouru	~6 €

Tableau 4 - Caractéristiques et coûts du tramway ferroviaire moderne

## 1.2.6 métro léger, métro automatique, monorail, et autres systèmes dédiés

### • Le métro conventionnel

C'est un système qui a pour vocation une desserte principalement urbaine et qui se retrouve dans la plupart des métropoles de plus de 2 millions d'habitants, tels Paris, Barcelone, Le Caire, Rome, Athènes, Kiev, etc, ainsi que dans certaines villes de 1 million d'habitants (Lyon, Marseille...).

La plupart des métros roulent sur des rails classiques à écartement standard. On trouve des métros sur pneus, comme à Paris, Marseille, Lyon, Montréal, Mexico ou Santiago. L'alimentation peut se faire par un 3<sup>ème</sup> rail ou par une caténaire rigide.

Il est entièrement séparé des autres trafics. Son insertion, suivant la densité des zones traversées, se fera en tunnel, viaduc ou surface. Cette dernière possibilité peut toutefois poser des difficultés au niveau des croisements.



Figure 12 - Métro de Pékin



Figure 13 - Métro de Buenos Aires

Ces principales caractéristiques :

- Capacité du système : jusqu'à 40 000 pphpd
- Vitesse commerciale : 25 - 35 km/h (selon l'espacement entre stations, les temps d'arrêt à celles-ci, le profil en long et le tracé de la ligne)
- Alimentation électrique par troisième rail (tunnel plus petit)
- Basse tension : 600 à 750 kV
- Vitesse maximale: 70 à 90 km/h
- Capacité d'un train : jusqu'à 1000 passagers
- Espacement moyen entre stations: 600 à 1200 m

L'insertion des MRT peut s'effectuer de trois façons : en surface (sur l'espace de voirie), en viaduc ou en souterrain par tunnel. La faisabilité et l'opportunité de chaque type d'insertion dépendent bien entendu des contraintes physiques, de la largeur disponible en surface, des pentes et des rayons de courbe minimum du tracé.

	En viaduc	En surface	En tunnel
Coût	Elevé	Faible / acceptable	Très élevé
Intégration urbaine	Impact visuel	Bonne (sauf modes lourds)	Bonne
Espace de voirie requis	faible	Largeur importante	Faible
Accessibilité	moyenne	bonne	moyenne

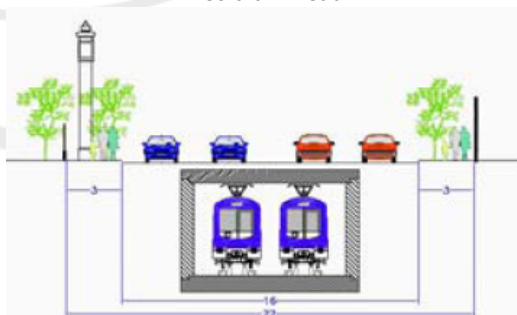
Figure 14 - Comparaison des différents types d'insertion



Métro à niveau



Métro en élévation



Métro en tranchée couverte



Métro en viaduc, Dubaï

Les coûts d'investissement sont de l'ordre de 20 à 40 M € pour une insertion au sol, de 40 à 75 M€ pour une un métro aérien et enfin de l'ordre de 60 à 180 M € pour un métro souterrain.



### • Le métro automatique

Le métro automatique, dont le plus connu est le VAL (véhicule automatique léger), est un métro généralement sur pneus, fermé et totalement automatique, donc sans conducteur.

Les rames sont alimentées par un troisième rail en courant continu de 750 V. Le guidage s'effectue par des rails latéraux comme pour un métro conventionnel. Elles peuvent gravir des pentes allant jusqu'à 7%, atteindre une vitesse de pointe d'environ 90 km/h, et circuler sur la ligne avec un intervalle maximal d'une minute et cinq secondes.

Chaque rame est composée de plusieurs voitures qui peuvent être couplées par paire. Les quais sont isolés des voies par des portes palières synchronisées sur les portes des rames. Pour cette raison, chaque quai doit être rigoureusement rectiligne.



Figure 15 - le VAL de Rennes



Figure 16 - Le VAL de Lille

Quelques caractéristiques du VAL :

- Espacement moyen entre stations: environ 700 m
- Vitesse commerciale : 32 km/h
- Vitesse de pointe : 80 km/h
- Capacité du véhicule: 154 passagers (avec 4p/m<sup>2</sup>)
- Intervalle : 100 s en heure de pointe jusqu'à 72 secondes quelques minutes
- Trafic: jusqu'à 110 000 trajets par jour (Rennes).

Le VAL, développé par Matra, fut le premier métro automatique mis en service (à Lille en 1983). Depuis, Matra transport a été racheté par Siemens et des métros automatiques plus capacitifs ont été réalisés.

Le coût d'investissement est de l'ordre de 50 à 60 millions d'euros du km (avec une insertion majoritairement aérienne).

### • Le monorail

Un monorail est un système de transport guidé comportant un seul rail. Les véhicules peuvent se déplacer à cheval sur le rail ou suspendus dessous, en utilisant différentes techniques de propulsion et de sustentation (roues, coussin d'air, sustentation magnétique...). La conduite peut être automatique ou manuelle. Ce système est souvent utilisé pour transporter des voyageurs sur des itinéraires ou des circuits relativement courts (desserte d'aéroport, foire -exposition, par exemple). Selon l'usage qui en est fait, la capacité du système est très variable. La plupart des monorails ont une capacité de l'ordre de 7500 pphpd, mais le débit maximum peut aussi atteindre dans certains cas 18000 pphpd.

De nos jours, un seul constructeur commercialise ce système (Mitsubishi) assez coûteux (insertion en viaduc) qui n'offre aucune flexibilité en exploitation.





Figure 17 - Monorail de Seattle, Etats-Unis



Figure 18 - Monorail ou H-Bahn de Dortmund, Allemagne

On observe par ailleurs certain nombre de contraintes comme la difficulté de conception de pôles d'échanges, des problèmes d'insertion et une faible efficacité économique.

Le coût d'investissement est de l'ordre de 40 à 100 millions d'euros par km.

### 1.2.7 Métro lourd (i.e. à gabarit ferroviaire)

C'est un métro à grande capacité, avec par rapport au métro conventionnel, des trains plus grands, des interstations plus importantes et des lignes plus longues. Il peut avoir une vocation urbaine ou de liaison centre – banlieue.



Figure 19 - Le métro de New York

Ces principales caractéristiques sont :

- Capacité : jusqu'à 50 000 pphpd (personne par heure et par direction)
- Vitesse commerciale : 30 – 40 km/h (selon l'espacement entre stations, les temps d'arrêts aux stations, le profil en long et le tracé de la ligne)
- Alimentation électrique par troisième rail ou caténaire, moyenne ou haute tension
- Vitesse maximale : ~ 100 km/h
- Capacité d'un train : jusqu'à 2000 passagers
- Espacement moyen entre stations : ~ 1500 m
- Roulement sur fer.
- **Le métro régional de type RER et les trains de banlieue**

C'est un système ferroviaire avec un écartement standard des rails. Il est partiellement ou totalement séparé des autres trafics et son insertion peut se faire en tunnel pour les zones denses, mais également en viaduc ou en surface.

Sa fonction principale est de transporter un grand nombre de passagers vers le centre depuis les zones suburbaines (jusqu'à 60 km du centre).

Ces réseaux sont constitués de lignes ferroviaires construites « à la campagne », i.e. avant le développement urbain, puis modernisées au fur et à mesure de l'évolution des besoins et des techniques.

Le RER (appelé S-Bahn dans les pays germaniques) est une adaptation des réseaux de trains de banlieue dont les principales caractéristiques sont : liaisons traversantes (souvent des lignes avec une gare terminus reliées à travers le centre ville avec un tunnel), quais hauts, séparation de la circulation ferroviaire générale. On peut rattacher à cette catégorie le métro du Caire, plusieurs lignes du métro de Séoul, plusieurs lignes de « train de banlieue » de Tokyo,...



Figure 20- le RER de Paris



Figure 21 - Train de banlieue à Tokyo

Ces principales caractéristiques sont :

- Capacité : jusqu'à 60 000 pphpd (Paris, Hong Kong)
- Vitesse commerciale : 40 – 60 Km/h (selon l'espacement entre stations, les temps d'arrêt aux stations, le profil en long et le tracé de la ligne)
- Alimentation électrique par caténaire (tunnel plus grand)
- Moyenne tension (1500 V DC) ou haute tension (25 kV AC)
- Vitesse maximale: 100 à 140 km/h
- Longueur des trains: de 70 à 300 m
- Capacité d'un train : jusqu'à 2000-3000 passagers
- Espacement moyen entre stations: 2000 à 3000 m
- Roulement sur fer.

	Singapour	Séoul	Hong-Kong	Santiago Ligne 4	Caracas
					3,05
				230	
		10			
		1920			

Tableau 5 - Comparaison de différentes lignes de MRT dans le monde

### 1.2.8 Trains

Les lignes de train de banlieue représentent la première étape du développement d'un réseau de TC à l'échelle d'une aire urbaine. Ses caractéristiques sont proches de :

- Capacité : la capacité est adaptée à la demande avec la fréquence. Une fréquence de ½ heure est un minimum usuel

- Vitesse commerciale : 40 – 60 Km/h (selon l'espacement entre stations, les temps d'arrêt aux stations, le profil en long et le tracé de la ligne)
- Alimentation électrique par caténaire, moyenne tension (1500 V DC) ou haute tension (25 kV AC), ou diesel en première étape
- Vitesse maximale: 100 à 140 km/h
- Longueur des trains: de 70 à 220 m
- Capacité d'un train : jusqu'à 2000 passagers
- Espacement moyen entre stations: 2000 à 3000 m, dépend des projets de développement urbain et des agglomération secondaires préexistantes

### ***1.3 Quelques choix stratégiques:***

Dans une perspective de long terme, il faut garder présents les enjeux stratégiques suivants :

- le développement des axes de TC lourds doit-il suivre ou précéder la ville.

Il s'agit là d'évaluer l'ampleur des modifications des formes urbaines qui se produiront du fait de l'exode rural ou de la dé-densification des zones urbaines actuelles. Les grands projets urbains (nouveaux quartiers, centres d'affaire,...) doivent être conçus avec les réseaux lourds adaptés.

Une infrastructure ferroviaire est beaucoup moins chère si elle est construite en terrain non urbain. Il peut être globalement plus intéressant de mailler la ville future et de ne construire les maillons de centre ville, très chers, qu'après, lorsque le développement apporte les ressources financières nécessaires. La valorisation des terrains peut aussi contribuer à payer les nouvelles lignes (cf : compagnies privées ferroviaires par actions du Japon).

- gabarit ferroviaire ou gabarit spécifique

Il est très difficile de changer les caractéristiques d'un système ferroviaire, notamment souterrain. Il peut donc être pertinent de faire des choix « normatifs », qui s'opposent à court terme à l'« optimisation » des bureaux d'études ou aux pressions des pays fournisseurs de systèmes, mais garantissent la possibilité de faire évoluer les réseaux pour répondre aux besoins futurs.