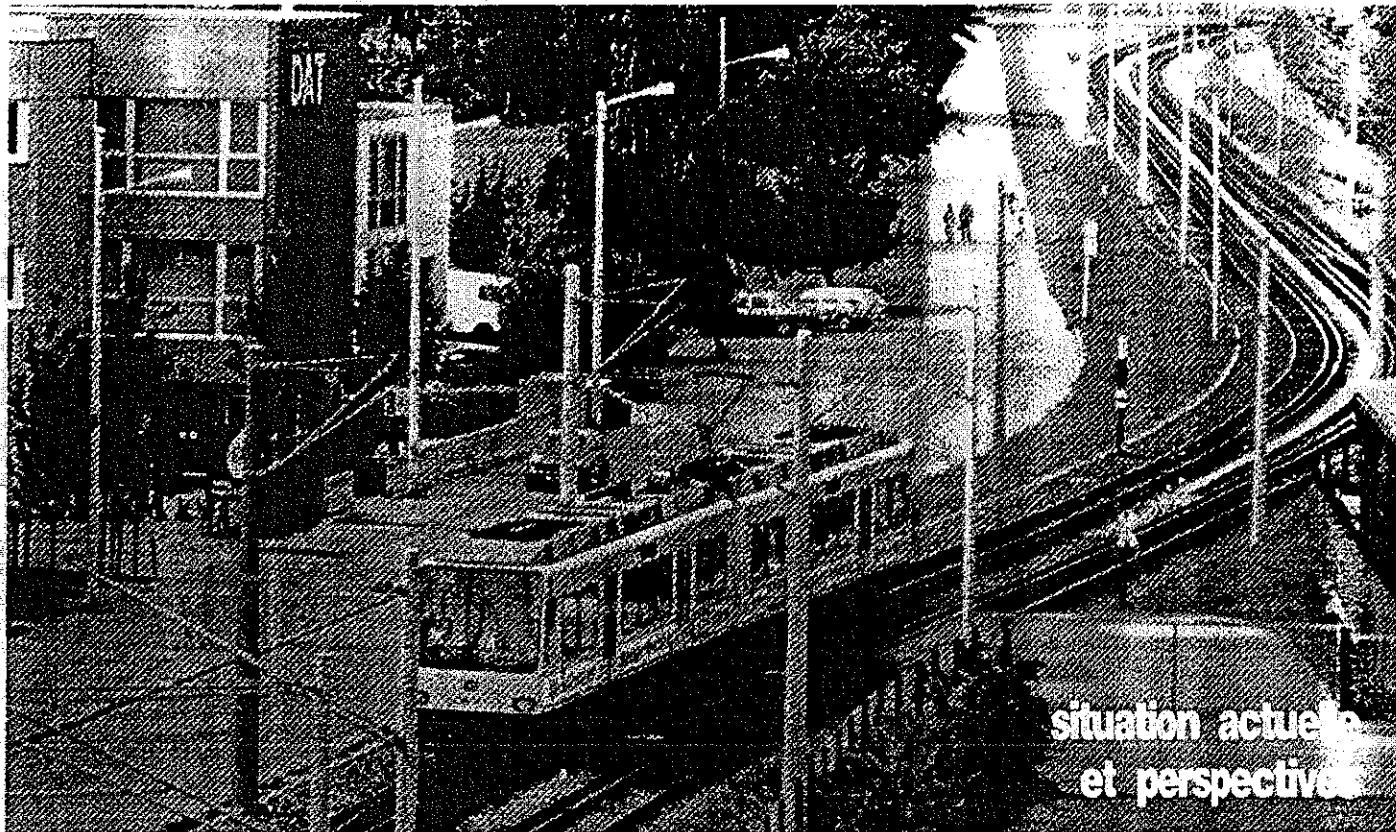


Francis KUHN

Ingénieur d'études
INRETS-CRESTA
Centre de Recherche et d'Evaluation
des Systèmes de Transport automatisés

Les transports urbains guidés de surface

2082



situation actuelle
et perspectives

Après un déclin continu au cours des années cinquante, les systèmes guidés de transport de surface connaissent un renouveau depuis une quinzaine d'années, sous forme de tramways classiques, soit, le plus souvent, sous forme de « métro léger » (Light Rail Transit — LRT en américain), sans oublier bien sûr les quelques réalisations de systèmes automatiques guidés (comme par exemple le VAL en France, le Skytrain au Canada, etc.), qui peuvent eux aussi le cas échéant être installés en surface sur certains tronçons, mais que nous n'abordons pas dans cet article consacré aux systèmes plus traditionnels non encore automatisés, et non complètement en site propre.

Ce renouveau se traduit :

- par des extensions de lignes existantes ou la création de lignes nouvelles dans un grand nombre de villes;
- par le développement de matériels roulants plus confortables et plus performants;
- par une amélioration des conditions de circulation de ces systèmes, obtenue par la mise en œuvre de différentes méthodes:
 - voies ou chaussées réservées,
 - passage en tunnel dans les centres de villes,
 - construction de lignes nouvelles sur des sites partiellement ou entièrement réservés; c'est à ce type de ligne que l'on réserve en général le qualificatif de « métro léger ».

Sous cette forme, le métro léger pourrait se prêter à l'automatisation de son exploitation.

L'INRETS-CRESTA, dans le cadre du Groupement Régional Nord-Pas-de-Calais pour la Recherche dans les Transports, a

décidé de lancer une action de recherche sur le thème de l'automatisation des transports de surface dont l'objectif est d'examiner l'intérêt que pourrait présenter l'application de stratégies de régulation évoluées à ces systèmes, et la possibilité d'envisager à terme une conduite intégralement automatique pour ceux de ces systèmes qui bénéficient des infrastructures les mieux protégées.

Afin toutefois de justifier un tel programme de recherche, il a été jugé utile au départ de procéder à une analyse de la situation actuelle des transports de surface guidés dans le monde, et de leurs perspectives d'évolution, en apportant une attention particulière aux systèmes circulant sur des sites protégés qui apparaissent comme étant les plus susceptibles de tirer parti d'une automatisation de leur exploitation.

La méthode de travail employée a comporté, outre une analyse bibliographique et une enquête en France auprès des différents services concernés, une visite d'un certain nombre de réseaux dans les pays voisins:

- En Belgique: Bruxelles et Charleroi,
- En Suisse: Bâle, Berne et Zürich,
- En Allemagne Fédérale: Cologne, Hanovre, Stuttgart et Nuremberg,
- En Hollande: Utrecht,
- En Grande-Bretagne: Blackpool.

Dans le présent article, après une brève description du marché ouvert à ces systèmes, on examine l'évolution de leurs sites d'implantation, puis leurs performances en fonction de ces sites; l'on évoque ensuite les évolutions des infrastructures et des matériels roulants, et l'on traite enfin des aspects liés à l'exploitation et à la sécurité.

Le marché des transports de surface guidés

La situation actuelle

La politique des différents pays vis-à-vis des tramways est variable, c'est ainsi que l'on trouve:

- Les pays dont les villes gardent d'anciens réseaux et qui continuent à les entretenir et les améliorer, ce sont essentiellement: la République Fédérale Allemande, la Suisse, la Belgique, les Pays-Bas, l'Autriche, les Etats-Unis dans une certaine mesure, le Japon et les pays de l'Est.

Ainsi parmi les villes européennes visitées, on constate que la plupart de ces villes, sans avoir de projets d'extension de leurs réseaux, cherchent à les maintenir et à en améliorer la qualité de service, d'autres comme Charleroi et Utrecht ont des projets d'extension.

— Les pays qui avaient abandonné totalement ou presque leurs réseaux de tramways dans les années d'après guerre et dans lesquels on assiste actuellement à un renouveau du tramway ou du métro léger, sont par exemple la France, la Grande-Bretagne, les Etats-Unis, etc. Dans ces pays, un certain nombre de réalisations ou d'extensions de réseaux ont vu le jour ces dernières années:

- En France: Nantes, Grenoble et Saint-Etienne (voir encadré),
- En Italie: Gênes, Rome et Turin,
- Aux Etats-Unis: Buffalo, Portland, Sacramento, San Diego et San Jose,
- Au Canada: Calgary et Edmonton.

De nombreux projets sont à des stades plus ou moins avancés de préparation:

- En France: Bobigny et Reims,
- En Grande-Bretagne: Birmingham, Edinburgh, Glasgow, Manchester et Sheffield,
- En Italie: Bologne et Florence,
- Aux Etats-Unis: Dallas, Denver, Houston, Jersey City, Kansas City, Los Angeles (Long Beach), Minneapolis-St Paul, St Louis et Seattle.

Cependant, ces projets restent limités et dans ces pays on constate une certaine concurrence entre les systèmes du métro léger et les systèmes automatiques en site propre intégral. Exemple les projets de Toulouse, Strasbourg, Bordeaux (Docklands) Toronto (Scarborough)

Les pays qui n'ont jamais eu de tramways et qui n'ont pas de projets, c'est le cas de la plupart des pays d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Extrême-Orient où seules de très grandes villes s'équipent en métros lourds, les villes moyennes se limitant à des transports routiers.

Implantation des réseaux existants

La taille des villes desservies par les réseaux de tramways ou métro léger est très variable selon les continents et les pays. L'histogramme (figure 1) fait apparaître que la taille des villes les mieux adaptées au tramway ou métro léger se situe entre 100 000 et 700 000 habitants.

Toutefois, on trouve encore de nombreux réseaux de métro léger dans des villes allant jusqu'à 1,5 million d'habitants: c'est le cas des réseaux américains dont la morphologie se caractérise par des longueurs de ligne plus grandes et par des pourcentages de sites propre et séparé plus importants qu'en Europe car ils utilisent souvent des plateformes ferroviaires ou autoroutières.

A contrario, le deuxième histogramme (figure 2) illustrant la répartition des réseaux de métros lourds dans le monde, montre que le marché de ces métros commence pratiquement par des agglomérations d'au moins 600 000 habitants.

Perspectives

Parmi les villes qui effectuent actuellement des travaux de réalisation de métro léger, qui ont des projets définis et décidés par leurs autorités, ou qui ont des propositions de schémas et des études de faisabilité, on trouve:

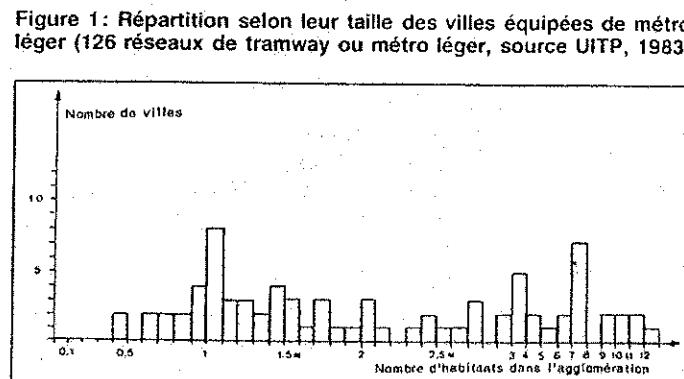
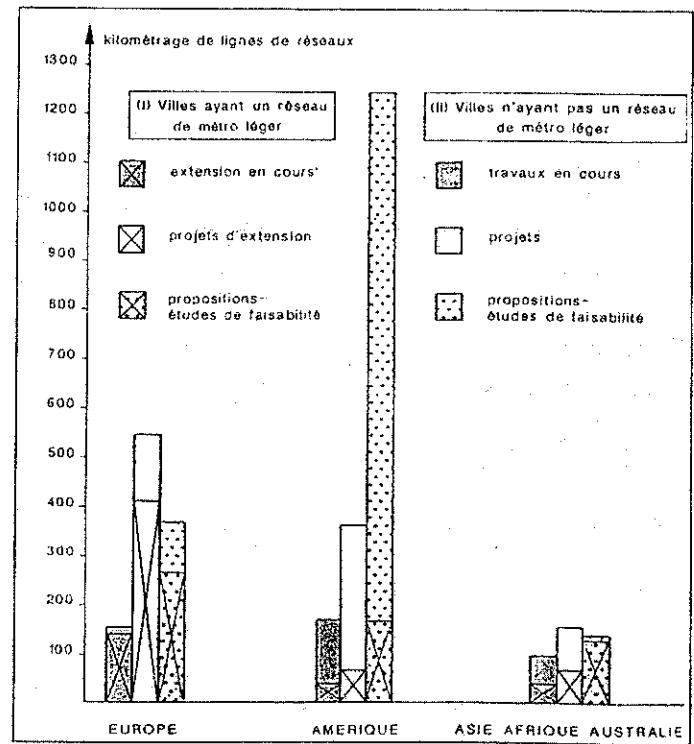
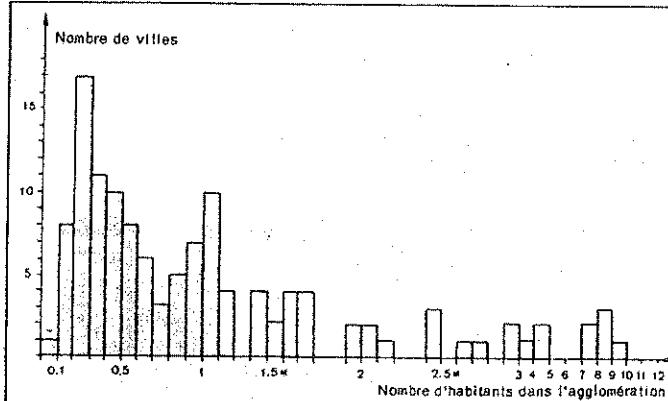


Figure 2: Répartition selon leur taille de villes équipées de métros (79 réseaux de métropolitains, source UITP, 1983)

— 48 villes ayant actuellement un réseau de tramways ou de métro léger qui poursuivent les travaux d'extension ou qui ont des projets.

— 40 villes qui n'ont pas de réseau de tramways ou de métro léger et qui réalisent un réseau de métro léger ou ont un projet.

Cette liste n'est pas exhaustive, surtout compte tenu du manque d'informations sur les pays de l'Europe de l'Est, l'URSS, la Chine.

Sur les 88 villes répertoriées, près de 1 500 km de lignes de métro léger sont soit en cours de construction (400 km), soit en projet, et 1 800 km font l'objet d'études préliminaires (figure 3).

C'est en Europe et en Amérique que l'on trouve les plus grands linéaires de projets (1 000 km environ), contre 150 km pour les villes d'Asie-Australie, mais la liste n'est pas exhaustive, surtout pour les pays de l'Est.

En Europe, la tendance est de continuer l'amélioration des réseaux existants en réalisant des mises en site séparé ou site propre intégral, mais on trouve très peu de villes n'ayant pas de réseau de tramways ou de métro léger qui se lancent dans un projet de métro léger: en effet l'affectation d'une partie de la voirie aux transports publics est une décision toujours difficile à prendre.

En Amérique, et notamment en Amérique du Nord étant donné que peu de villes ont un réseau de tramways ou métro léger, il y a comparativement peu d'extensions de réseau mais de très nombreux projets dans des villes qui n'ont pas de réseau.

En Asie, Afrique et Australie, on ne compte que 150 km de projets, pour 100 km en cours de réalisation; étant donnée la densité de population, certaines villes préfèrent le métro lourd, et les avant-projets de lignes de métro lourd atteignent 900 km.

Caractéristiques d'infrastructure et influence sur l'exploitation

Les sites d'implantation

Les voies du métro léger se répartissent selon quatre types de sites:

- le site propre intégral qui correspond généralement aux réalisations nouvelles en centre-ville en situation dénivélée: tunnel ou viaduc;
- le site séparé qui correspond aux plateformes indépendantes au milieu ou le long d'un boulevard ou sur une ancienne plateforme de chemin de fer;
- le site réservé qui correspond à des voies situées sur la

chaussée, délimitées par un marquage réalisé en général à l'aide de peinture ou en utilisant un revêtement spécifique mais non séparées physiquement de la circulation générale;

— le site banalisé constitué par des voies posées sur la chaussée utilisée par la circulation générale: ces sites se trouvent plutôt dans des réseaux anciens sur des chaussées à trafic faible, ou des chaussées trop étroites sur lesquelles il n'est pas possible de réserver une emprise appropriée pour le tramway.

On peut classer dans ce dernier type de site les rues mixtes piétons-transports collectifs dans lequel la chaussée est uniquement utilisée par les piétons et pour le passage des tramways.

Tableau 1: Linéaire de treize réseaux européens de métro léger

Ville	Nombre de lignes	Type de site								Linéaire d'axe en km	Observations
		Propre intégral		Séparé		Protégé		Banalisé			
		en km	en %	en km	en %	en km	en %	en km	en %		
Bruxelles	18	10,3	7,01	56,5	38,4			80	54,5	146,9 N	
Charleroi	7	7	6	54,35	47			54	47	115,35 M	
Utrecht	1			17,2	96			0,7	4	17,9 N	
Hanovre	11	13,12	14,35	49,32	54			28,94	31,66	91,38 N	
Cologne	15	33,3	22	89,9	59,4			28,1	18,6	151,3 N	
Stuttgart	11	10,3	8,9	73,85	64,3			30,62	26,7	114,7 MN	
Zürich	13	2	2,9	13,5	19,9	9,35	13,8	42,75	63,3	67,6 M	
Berne	3			2,1	15,3	0,8	5,8	10,8	78,8	13,7 M	
Bâle	10*			24,4	39,9	11,4	18,6	25,3	41,4	61,1* M	* Réseau de Bâle Ville (BVB). Le linéaire du réseau de Bâle Campagne (BLT) est de 23,4 km en site séparé
Nüremberg . . .	6			17,9	37,7			29,5	62,2	47,4 N	
Blackpool . . .	1			17,4	94,5			1	5,4	18,4 N	
Nantes	1			10,5	99 (1)					10,5 N	(1) Hors longueur des carrefours à niveau
Grenoble	1			7	78,6			1,9	21,3	8,9 (2) N	(2) Longueur exploitée, la longueur totale étant de 10,75 km

Note: Tous les réseaux ont une partie du linéaire en site protégé de la circulation générale par la signalisation; lorsque ce linéaire n'apparaît pas sur le tableau, n'ayant pu être obtenu, il est inclus dans le linéaire de site banalisé.

N indique un écartement de voie normal à 1,435 mm. M indique un écartement métrique.

Tableau 2: Répartition des lignes selon le pourcentage de site séparé sur treize réseaux européens

Ville	Nombre de lignes du réseau	Nombre de lignes			Observations
		ayant un fort % SP + SS (1)	Entièrement en SP + SS (1)	Total	
Bruxelles	18		2	2	
Charleroi	7		8*	8	* Vers 1995 lorsque le réseau sera achevé
Utrecht	1	1		1	
Hanovre	11	6*		6	* 2 lignes supplémentaires en 1990-95
Cologne	15	7		7	
Stuttgart	11	3*	3	6	* 2 lignes supplémentaires en 1990
Nuremberg	6	0		0	
Zürich	13	0		0	
Bâle	10	1		1	
Berne	3	0	0	0	
Blackpool	1	1		1	
Nantes	1	1		1	
Grenoble	1	1		1	Mise en service prévue fin 1987

(1) SP = site protégé — SS = site séparé.

Les sites existants

Pour une même ligne d'un réseau donné, on trouve tous les types de sites avec, dans les réseaux les mieux organisés, une hiérarchie partant du site propre intégral dans le centre-ville où l'urbanisation est généralement très dense pour arriver au site séparé en périphérie où l'espace viaire le permet, un certain nombre de tronçons restant cependant en site banalisé. On a recensé dans le tableau 1 la répartition des sites sur les onze réseaux européens visités.

Par ailleurs, l'un des objectifs principaux de cette étude étant d'évaluer l'importance des lignes de transport de surface présentant les caractéristiques les plus favorables au développement de l'automatisation et ayant en particulier la plus grande partie de leur linéaire en site propre ou séparé, nous avons essayé de recenser ces lignes.

Nous considérons qu'une ligne entre dans cette catégorie lorsqu'elle est en site propre ou séparé sur au moins 75% de sa longueur. Le tableau 2 donne un état de ces lignes dans les différents réseaux visités.

Il apparaît donc que dans les 11 villes visitées, totalisant 96 lignes, 32 lignes ont ou vont avoir à court terme un pourcentage de linéaire en site propre ou séparé supérieur à 75% de leur longueur. Ces lignes se trouvent en majeure partie en Allemagne, les villes allemandes faisant un effort particulièrement soutenu pour améliorer progressivement les performances de leurs métros légers.

L'évolution des sites

La tendance des réseaux existants est d'accroître les parties en site propre ou séparé de leurs lignes de tramways. Cette tendance se confirme pour les lignes nouvelles, qui sont généralement construites en site séparé, en utilisant différents types d'entreprises: plateformes ferroviaires, corridors autoroutiers, voirie urbaine.

Les plateformes ferroviaires

L'utilisation de plateformes ferroviaires permet d'accéder au centre-ville sans de gros investissements de mise en souterrain: les lignes de Tijuana et El Cajon à San Diego, la ligne

Los Angeles-Long Beach, les lignes de Calgary, Edmonton, Portland... la ligne de l'Albtalbahn à Karlsruhe, certaines lignes du réseau de Cologne, Stuttgart, Göteborg, sont des exemples.

Les corridors autoroutiers

Sur quelques réseaux, les autobus empruntent une voie séparée sur des autoroutes urbaines; il devient intéressant d'utiliser cette emprise séparée pour y installer un métro léger si le trafic le nécessite: les réalisations de Los Angeles, Sacramento, Portland et San Jose (Guadalupe Corridor) en sont des exemples.

L'influence des sites sur la vitesse commerciale

Les tramways sont pénalisés par les perturbations dues à la circulation générale, et il leur est souvent reproché une vitesse commerciale insuffisante. C'est l'une des raisons pour lesquelles de nombreuses lignes et réseaux ont été supprimés au cours de ces cinquante dernières années. C'est également l'une des raisons pour lesquelles les villes qui ont conservé leurs réseaux de tramways cherchent à en améliorer la qualité de service:

- en séparant autant que faire se peut les plateformes de tramways de la circulation générale,
- en donnant la priorité aux transports collectifs aux points de conflits que constituent les carrefours à niveau avec la circulation générale.

Si l'on considère les vitesses commerciales moyennes de chacun des réseaux visités, entre les années 1966 et 1983 (cf. tableau 3), on voit que la tendance générale est à l'augmentation sensible de ces vitesses, cette augmentation en valeur relative n'étant cependant pas directement proportionnelle à l'accroissement du pourcentage de mise en site séparé réalisée sur le réseau.

Cependant, il apparaît nettement que les réseaux qui ont des tronçons importants en site séparé ont des vitesses commerciales supérieures à celles des réseaux qui ont un important linéaire en site banal.

Tableau 3: Evolution des vitesses commerciales et pourcentage de linéaire en site séparé au cours des dernières années

Ville	En 1966	En 1973	En 1977	En 1983	Observations
Bruxelles	14,8 km/h	17 km/h 52%	17 km/h 40%*	17,17 km/h 45,47%	* Utilisation d'une ligne de tramway par le nouveau métro. Sur les tronçons de prémétro, la vitesse est de 23 km/h, en périphérie de 26,9 km/h (ligne 44)
Charleroi	18 km/h 38%	20 km/h 40%	21 km/h 50%	* VC sur ancien réseau: 19,5 km/h VC sur réseau modernisé (80% de SS) 24,5 km/h	
Utrecht				29 km/h 95%	
Hanovre	Ligne A 18,9 km/h	réseau 20,7 km/h 38%	réseau 20,1 km/h 53%	Ligne A 22,1 km/h	En 1983, 68% de site propre et séparé sur l'ensemble du réseau
Cologne	18,6 km/h	22,1 km/h 64%	22,7 km/h 72%	23,5 km/h 81,4%	La vitesse la plus élevée est enregistrée sur la ligne 13: elle est de 45 km/h sur une section de 7,5 km en site propre
Stuttgart	17,3 km/h 34%	19,45 km/h 37%	19,51 km/h 37%	20,2 km/h 68,33%	Avec l'arrivée du nouveau véhicule DT8, la SSB envisage d'atteindre 25 km/h de vitesse commerciale
Zürich	14,2 km/h 15,8 km/h	15,5 km/h 6%	15 km/h 9%	13 à 15 km/h 15,4%	
Berne	14,14 km/h	14,8 km/h 8%	14,7 km/h 12%	16 km/h 15,3%	
Bâle	16,5 km/h	16,3 km/h 29%	17,71 km/h 40,37%	12,9 à 26,1 km/h Réseau	BVB + BLT
Nüremberg	16,1-17,4 km/h	16,9 km/h 30%	16,7 km/h 46%	16,5 37,7%	
Blackpool		20,9 km/h	20,9 km/h 94,5%	20,9 km/h 94,5%	

Note:

- Le premier nombre représente la vitesse commerciale moyenne du réseau en km/h.
- Le deuxième nombre est le pourcentage du linéaire en site propre et site séparé de l'ensemble du réseau.
- Les sources:
 - Les statistiques des Transports Publics Urbains UITP de 1968 et 1975.
 - Les Tramways en Suisse et en RFA par SODETRANS de 1979.

La voie

Les techniques de construction de la voie ont beaucoup progressé, et il existe une réglementation détaillée et de nombreuses directives notamment en ce qui concerne les caractéristiques géométriques, physiques et fonctionnelles.

Voie unique et voie double

Il est intéressant de noter qu'un certain nombre de métros légers parmi les plus récents, ont été prévus pour une circulation sur voie unique, en ménageant quelques passages à voie double pour permettre les croisements. C'est le cas notamment en Suisse avec la ligne du réseau de Neuchâtel et le projet de ligne à Lausanne, aux Etats-Unis avec les lignes des réseaux de la Nouvelle Orléans, Pittsburgh, Philadelphie, Sacramento (en construction) et San Diego.

L'intérêt de cette configuration est:

- qu'elle permet des économies sur les investissements de génie civil,
- qu'elle peut permettre plus facilement d'implanter certains tronçons sur des sites séparés.

En contrepartie, elle a l'inconvénient de pénaliser la fréquence de la ligne; elle nécessite une signalisation particulière pour assurer la sécurité et des moyens de régulation pour optimiser cette fréquence.

Caractéristiques de la voie

Les techniques de construction des voies peuvent être classées en trois catégories:

- La voie noyée, qui est généralement utilisée en site banalisé, est caractérisée par l'emploi d'un rail à gorge qui permet l'accès des véhicules routiers, le passage des piétons et des cyclistes...
- La voie sur ballast est le type actuellement le plus répandu pour les sites séparés ou site propre intégral; elle est caractérisée par l'utilisation du rail Vignole infranchissable par des véhicules routiers et difficilement franchissable par des cyclistes.
- La voie découverte sur béton avec utilisation de rails Vignole est le type de voie le moins répandu; on le trouve surtout sur des ouvrages tels que viaduc, pont ou tunnel. Le réseau de Cologne, promoteur de ce type de construction, possède plus de 25 km d'axes de ce type de voie appelé à être utilisé chaque fois que la voie passe sur un ouvrage en béton.

L'écartement des voies varie selon les pays, en général on rencontre l'écartement normal de 1 435 mm (ou 4 pieds 8,5 pouces) l'écartement métrique sur les réseaux européens anciens, en Suisse par exemple, l'écartement étroit 900 mm à Lisbonne, Linz, l'écartement large de 1 524 mm ou 5 pieds en URSS et aux USA.

Les évolutions du matériel roulant

La situation actuelle

Les véhicules de métro léger doivent être attractifs, donc modernes. La tendance de ces dernières années est à l'augmentation de l'offre et de la productivité: les véhicules sont de taille importante, de 20 à 40 mètres de long, et de 2,20 m à 2,65 m de large avec possibilité de former des rames en unité multiple; la capacité unitaire de ces véhicules se situe entre 200 et 300 passagers.

L'utilisation de hacheurs de courant avec les moteurs de traction permet la commande progressive de la traction qui offre un confort de roulement et une meilleure utilisation de l'adhérence et des gains de consommation au démarrage et aux vitesses réduites; il est possible de récupérer de l'énergie électrique avec le freinage si l'installation électrique est adaptée. Les moteurs asynchrones alimentés par onduleurs apparaissent progressivement: cette technologie apporte une réduction des frais d'entretien du moteur exempt de collecteur et de construction particulièrement robuste, une diminution de poids et du volume du moteur par la suppression du collecteur et la possibilité d'augmenter la vitesse de rotation maximale et une réduction de l'appareillage avec la suppression de l'inverseur de sens de marche, celui-ci étant remplacé par la permutation de la séquence de commande des thyristors.

L'augmentation des vitesses commerciales nécessite d'améliorer les performances de vitesse et d'accélération, et la tendance est à augmenter la motorisation; ainsi on constate que la puissance massique à vide des véhicules sortis en 1960 se situe entre 10 et 12 kw/tonne; celle des véhicules qui sortent dans les années 80 se situe entre 12 et 14 kw/tonne.

Ces véhicules offrent le confort souhaité par les usagers, confort que l'on trouve au niveau des accès, des sièges, du chauffage, de la climatisation si nécessaire, de la signalétique, de la sonorisation, de l'éclairage, des couleurs.

Perspectives

Les recherches, en vue d'améliorer les performances du matériel roulant, se poursuivent et devront conduire encore à des évolutions importantes. Nous évoquerons:

- la tendance de certains réseaux à adopter un plancher bas pour leur nouveau matériel roulant;
- les perspectives d'évolution des véhicules de tramways tels qu'on peut les entrevoir à partir d'un projet allemand baptisé «Stadtbahn 2000»;
- les recherches et expérimentations portant sur de nouveaux types de transports guidés fondés sur des véhicules de type autobus.

Le matériel roulant à plancher surbaissé

On constate que certains réseaux adoptent des véhicules à plancher bas pour faciliter l'accessibilité de leurs usagers notamment à mobilité réduite, pour améliorer le temps d'échanges en station et faciliter l'insertion des quais en site urbain: ainsi le réseau de Genève adopte en 1984 un véhicule articulé (Dwag et A.C. de Vevey) dont le plancher se situe à 48 cm du plan de roulement sur une longueur de 12,50 m au droit des accès, mais il subsiste un emmarchement interdisant l'accès des fauteuils roulants.

Un prototype du tram 2800 (Fiat) est en service sur le réseau de Turin depuis la fin 1986, son plancher est à 34 cm du plan de roulement entre les 2 bogies moteurs au droit des accès.

Le réseau de Grenoble doit bientôt mettre en service des véhicules à plancher surbaissé, dérivés du tramway français standard (Alsthom), dont le plancher se situe à 34,50 cm au-dessus du plan de roulement sur une longueur continue de 17,85 cm au droit des accès. D'autres projets sont à l'étude pour le réseau d'Amsterdam et en RFA.

Le projet allemand Stadtbahn 2000 (métro léger 2000)

Le projet est né de la constatation qu'il existait de grosses différences dans les modes de construction des divers types de transports urbains: tramways, métros, véhicules de type RER, et que les tramways ou métros légers se caractérisent par un poids — et donc un coût — à la place relativement élevé par rapport aux autres véhicules (cf. figure 4).

Il est apparu par conséquent souhaitable d'étudier la possibilité de standardiser la construction de ces véhicules avec trois objectifs principaux:

- diminution du poids de la caisse et des bogies,
- amélioration des qualités de roulement afin de diminuer les bruits et l'usure dans les courbes,
- reconception des équipements de bord, et notamment des équipements électriques.

Autobus guidés

La notion d'autobus bimode

Au début des années 1970 est apparue l'idée de l'autobus bimode du point de vue de l'infrastructure: devant les difficultés rencontrées en milieu urbain, on offre à l'autobus une infrastructure réservée, puis dans les zones résidentielles périphériques l'autobus continue à rouler en site banalisé. Par ailleurs, l'accroissement du coût de l'énergie et une prise de conscience des facteurs écologiques ont favorisé l'introduction de l'autobus bimode du point de vue de la motorisation, alimenté par l'énergie électrique (captée) en site séparé et utilisant une énergie embarquée en site banalisé: le réseau de trolleybus de la ville de Nancy a adopté ce type de véhicule, en l'occurrence un bimode électrique/thermique où la source d'autonomie est constituée par un moteur Diesel.

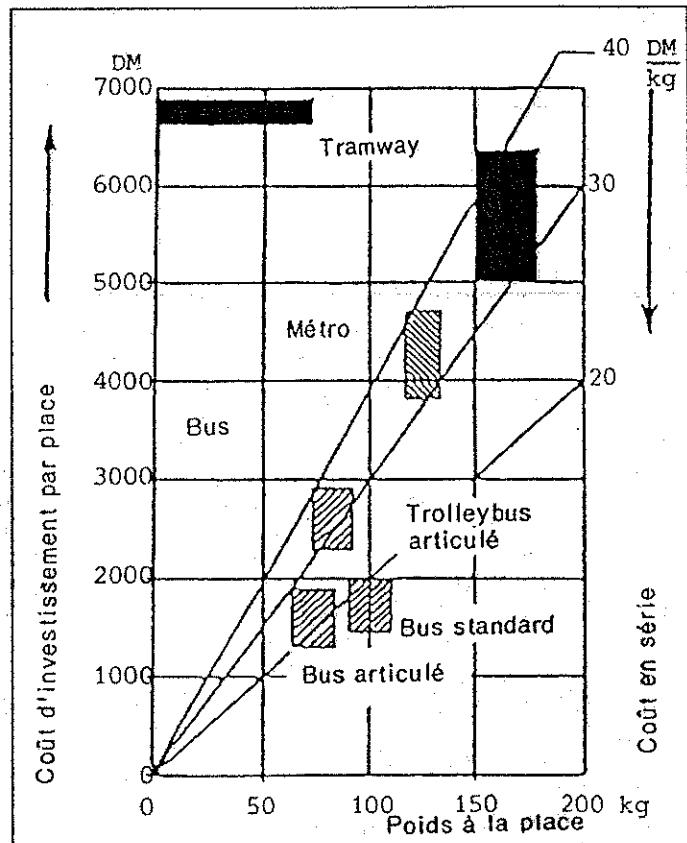


Figure 4: Données de poids et de coût de différents véhicules de Transport (source: Nahverkehrs Forschung 1983).

Le tramway français standard

Le concours d'idées lancé en 1975 concernant le projet de tramway français standard avait pour but de relancer l'utilisation du tramway dans les villes moyennes françaises.

Les caractéristiques principales de ce véhicule bi-directionnel à deux caisses sur trois bogies dont deux moteurs construit par le groupement ALSTHOM, FRANCORAIL, MTE, CIMT et TCO, sont:

— longueur hors tout	28,50 m
— largeur de caisse	2,30 m
— hauteur de plancher	0,85 m
— écartement des bogies	1,435 m
— capacité en charge normale (4 personnes par m^2)	168 places dont 60 assises
— en charge maximale (6,6 personnes par m^2)	238 places
— masse en charge normale	52 tonnes
— puissance	2 x 275 kw. soit 550 kw
— vitesse maximale	80 km/h
— tension nominale	750 volts courant continu

Deux réalisations ont vu le jour ces dernières années:

— A Nantes, où une ligne de 10,5 km est exploitée avec 20 éléments depuis janvier 1985.

A Grenoble, où une ligne de 8,9 km exploitée avec 20 éléments doit être mise en service au cours du dernier trimestre de 1987.

Le tramway adopté par le réseau de Grenoble présente quelques caractéristiques différentes, elles concernent:

— longueur hors tout	29,40 m
— hauteur du plancher:	
• plancher bas	0,345 m (sur 17,85 m)
• plancher haut	0,850 m (aux extrémités)
— capacité:	
en charge normale	174 places dont 76 assises (22 strapontins)
en charge maxi	252 places dont 54 assises
— masse en charge normale	56 tonnes



Le tramway de Nantes dans une station du centre



Le tramway de Grenoble à plancher surbaissé

La dernière ligne de tramway du réseau de Marseille

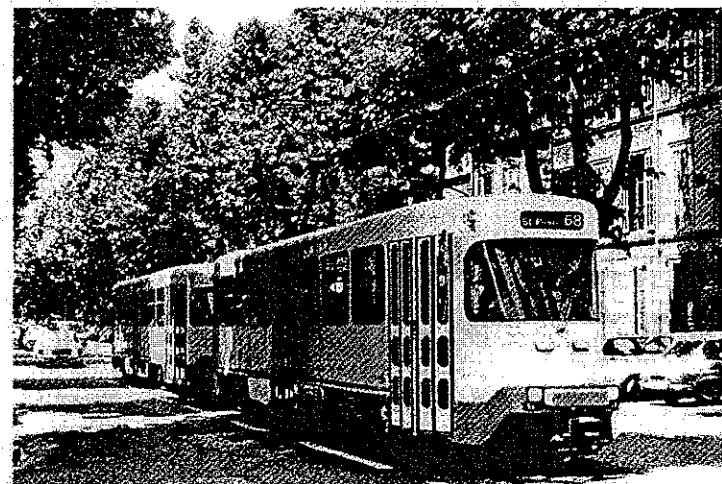


Tableau 4: Dispositifs de régulation du trafic

Villes	Fonctions et dispositifs de régulation	Signalisation d'espacement	Commande signalisation de carrefours	Commande d'aiguilles	Protection de carrefours avec barrières	Suivi et identification	Commandes centralisées	Régulation: mode de réalisation
Bruxelles	Surveillance par cantonnement en souterrain (CAV) (1)	Priorité à certains carrefours	Commande embarquée	non	TCO (2) pour la partie pré-métro, PCC (3) prévu pour l'ensemble du réseau	Liaison radio	Pas de dispositif	
Charleroi	Cantonnement prévu en souterrain	Prévue avec la mise en service de métro léger	Commande embarquée	non	PCC prévu ultérieurement	Liaison radio prévue	Pas de dispositif	
Utrecht	Surveillance par cantonnement dans les courbes et à proximité du dépôt	Commande à partir du système Vetag	Commande embarquée Vetag	Hors agglomération	TCO pour entrée et sortie du dépôt PCC prévu	Radiotéléphonie prévue	Pas de dispositif	
Hanovre	Cantonnement en souterrain	Onde verte sur les tronçons en site séparé	Commande embarquée	non	PCC avec ordinateur TCO	Liaison radio	Terminal de bord avec affichage du retard ou de l'avance	
Cologne	Cantonnement en souterrain et viaduc	Priorité non généralisée surtout en centre-ville	Commande embarquée	Sur des lignes utilisées par des trains de marchandises	PCC avec ordinateur TCO	Liaison radio	Terminal de bord	
Stuttgart	Cantonnement en souterrain	Ponctuellement mais sur les lignes de métro léger	Commande par détection de la caténaire	Sur une ancienne ligne de chemin de fer	PC avec TCO pour la partie souterraine, PCC avec ordinateur pour ligne de métro léger prévu	Liaison radio	Terminal de bord prévu avec un nouveau PCC pour le métro léger	
Zürich	Cantonnement dans le souterrain de Schwamendingen	Priorité à certains carrefours et onde verte	Commande embarquée	non	PCC avec ordinateur suivi sur consoles	Liaison radio	Terminal de bord avec affichage du retard ou de l'avance	
Berne	Marche à vue	Priorité aux transports en commun	Commande embarquée	non	PCC prévu	Liaison radio	Terminal de bord prévu	
Bâle	Marche à vue	Priorité modulée suivant le carrefour	Commande embarquée	2 barrières	PCC avec ordinateur suivi sur écrans	Liaison radio	Terminal de bord avec affichage du retard ou de l'avance	
Lille	Marche à vue Cantonnement en souterrain	Onde verte en site séparé	Contact sur la caténaire, et à partir d'un PC pour le terminus Gare	non	TCO pour la partie souterraine et le terminus Gare	Liaison radio	Pas de dispositif	
Marseille	Marche à vue Cantonnement en souterrain	Priorité aux carrefours	Commande embarquée	non	PCC avec ordinateur commun aux 2 lignes de métro	Liaison radio	Terminal de bord avec affichage du retard ou de l'avance	
Nantes	Marche à vue Cantonnement dans les zones de terminus et atelier	Priorité aux carrefour	Commande embarquée	non (4)	PCC avec ordinateur et TCO	Liaison radio	Terminal de bord avec affichage du retard ou de l'avance	
Saint-Etienne	Marche à vue	Priorité aux carrefours	non	non	TCO et caméras prévues le long de la ligne	Liaison radio	Pas de dispositif	
Grenoble	Marche à vue et cantonnement dans les zones de terminus et le dépôt	Priorité aux carrefours	Commande embarquée	non	PCC avec ordinateur et TCO	Liaison radio	Terminal de bord	

(1) CAV: Contrôle Automatique de Vitesse - (2) TCO: Tableau de Contrôle Optique - (3) PCC: Poste de Commande Centralisé.

(4) 3 passages à niveau sont communs avec des voies SNCF; les barrières n'encadrent que les voies SNCF; la fermeture des barrières est commandée par l'arrivée des trains, l'ouverture tient compte d'un tramway approchant du passage à niveau.

Les différents types de guidage

De nombreuses recherches et expérimentations ont été menées au cours de ces 10 dernières années dans différents pays sur les méthodes de guidage des autobus, nous évoquerons ci-dessous 3 méthodes de guidage:

— Le «SPURBUS» allemand à guidage mécanique

Il s'agit d'un projet lancé sous l'égide du Ministère allemand de la recherche et de la technologie (BMFT) avec le concours de la firme Daimler-Benz, en vue de la mise au point et de la réalisation progressive d'un service mixte tramways/autobus utilisant les mêmes emprises, notamment en tunnel.

Le guidage des autobus est assuré par des murets verticaux situés le long des voies de roulement, l'autobus étant équipé de roues de guidage latérales qui agissent sur les fusées de l'essieu avant.

Une expérimentation est en cours à Essen avec des trolleybus bimodes et des autobus depuis 1980. L'exploitation d'une ligne a commencé à Adélaïde (Australie) depuis 1986 sur 6 km,

prolongée de 6 km cette ligne sera exploitée avec une certaine d'autobus Diesel.

— Le SPURBUS à guidage électronique

Ce système d'autobus filoguidés a été étudié sous l'égide du BMFT, avec le concours des firmes MAN et Daimler-Benz. Une expérimentation a eu lieu à Fürth en 1984-85 sur une portion de ligne d'autobus de 700 m, sur la Königswarterstrasse, et s'est déroulée dans de bonnes conditions. Toutefois, aucune suite ne lui a été donnée jusqu'à présent.

— Guidage par rail axial

En Belgique, un constructeur, la Bruggeoise et Nivelles, propose un bus articulé (3 caisses) pour un système bimode guidé par un rail central GLT (Guided Light Transit), chaque véhicule pouvant être accouplé pour former une rame de 3 unités maximum d'une longueur de 76 mètres, avec une capacité de 600 passagers (6 pas/m²); chacun des 4 essieux est orientable en mode guidé, le rayon minimum est de 12,5 mètres; ce système est envisagé pour le réseau de la ville de Mons.

Régulation du trafic et sécurité d'exploitation

Les méthodes d'exploitation et de régulation du trafic

Afin d'une part d'assurer la sécurité des circulations sur les zones en site propre, et d'autre part d'améliorer la régularité des lignes en site banalisé, de nombreux réseaux ont été amenés à introduire des aides à l'exploitation sur leurs lignes de tramways. Ces aides peuvent être classées en trois catégories:

— *cantonnement de la voie* par des circuits de voie et signalisation d'espacement sur les parties de ligne en site propre, notamment en tunnel;

— *priorité aux feux de carrefours*. On obtient une amélioration sensible de l'exploitation du métro léger lorsqu'une grande partie du réseau se trouve en site séparé et si les temps morts sont supprimés au droit des carrefours à niveau avec la circulation générale: la majeure partie des pertes de temps imputables aux causes extérieures à l'exploitation proviennent en effet de la signalisation par feux et elles peuvent, dans certaines villes, représenter 10 à 20% du temps de rotation.

— *systèmes de surveillance et de régulation centralisée*. De tels systèmes sont particulièrement utiles pour l'intégration des services assurés par les autobus, trolleybus et métros légers d'une agglomération, car ils peuvent surveiller l'ensemble de l'exploitation, détecter les incidents, permettre le respect des horaires pour que les correspondances soient assurées en souplesse.

L'ordinateur localise les véhicules et compare les situations théoriques avec les situations réelles en ligne: c'est le suivi de l'exploitation en temps réel.

L'analyse des informations recueillies permet d'établir les comptes rendus d'incidents et les statistiques, ce qui permet d'améliorer l'exploitation: c'est le suivi de l'exploitation en temps différé.

Le tableau 4 récapitule les principaux dispositifs de régulation et d'aide à l'exploitation mis en place sur les réseaux de métro léger visités.

La sécurité dans l'exploitation du métro léger: effet des aménagements de sites

On peut d'abord rappeler les résultats d'une première étude menée par le CRESTA en 1984 sur les accidents du Mongy entre Lille-Roubaix-Tourcoing, qui montrent que les 76 accidents enregistrés en 1983 se répartissaient comme le montre le tableau 5.

Ce tableau fait apparaître:

- d'une part un nombre élevé d'accidents aux carrefours, qui sont les points faibles d'un métro léger, que ce soit en site séparé ou en site banalisé;
- d'autre part un effet favorable de la présence de sites séparés sur les accidents en ligne.

Effet de l'aménagement des sites sur les collisions

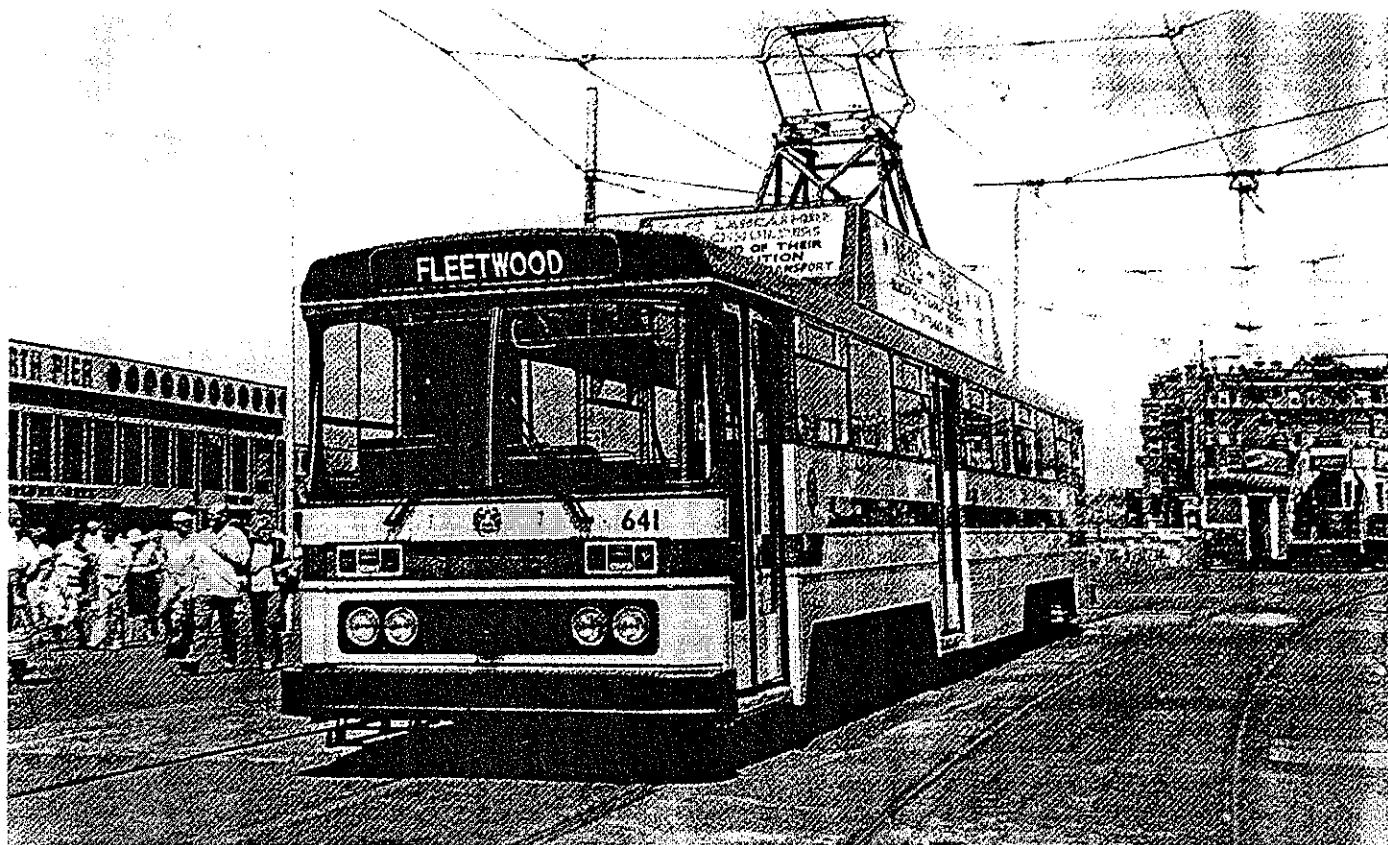
Une étude globale portant sur un ensemble de 26 réseaux allemands sur la période 1970-1980 semble confirmer qu'un aménagement de sites est favorable à la sécurité (tableau 6). Les résultats de cette enquête montrent que malgré l'augmentation de la circulation, 70% des réseaux ayant réalisé des aménagements voient le nombre d'accidents diminuer.

Tableau 5: Conditions de circulation du Mongy
(source IRT-CRESTA)

Type de site	Caractéristiques du site		Nombre d'accidents	
	linéaire km	Nombre de carrefours	en ligne	en carrefour
Site propre ou séparé	17,6	37	6	32
Site banalisé ou non protégé matériellement	3,5	20	25	13

Tableau 6: Volume d'accidents - Comparaison 1970/1980
(Source: Congrès UITP, 1983)

Accidents	Réseaux ayant réalisé des mises en site séparé		Réseaux n'ayant pas réalisé d'aménagements	
	20	6		
En diminution	14	70%	1	16,6%
En accroissement	5	25%	4	66,6%
Stable	1	5%	1	16,6%



Conclusion

Cette synthèse montre que les tramways et métros légers occupent une place importante dans les transports urbains, puisqu'ils représentent environ 1 250 lignes totalisant une longueur de plus de 13 300 km dans le monde. Après un important déclin dans les années 1950, ils ont retrouvé un certain dynamisme, qui se traduit:

- par la réalisation de lignes nouvelles: 400 km sont en construction actuellement, et 1 500 km sont en projet; le regain d'intérêt pour ce type de transport est particulièrement net aux USA;
- par l'amélioration des réseaux existants, et en particulier l'augmentation du linéaire de sites propres ou séparés de la circulation générale, ce qui permet d'obtenir des vitesses commerciales très satisfaisantes sur certaines lignes, de l'ordre de 30 km/h;

— par l'amélioration des matériels roulants, tant sur le plan des coûts et des performances d'exploitation que sur le plan du confort pour l'usager.

L'examen de la répartition des réseaux existants fait apparaître que le métro léger est particulièrement bien adapté pour une gamme de villes ou d'agglomérations ayant une population se situant entre 200 000 et 600 à 700 000 habitants, dans lesquelles la construction de métros est difficilement envisageable en raison des investissements exigés.

L'importance du marché ouvert à ces systèmes et le fait que de nombreuses lignes tant existantes qu'en projet soient construites en grande partie en site propre ou séparé, justifient que l'on consacre certains efforts de recherche aux possibilités offertes par l'automatisme pour améliorer l'exploitation de ce mode de transport.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Les transports guidés de surface: situation actuelle et perspectives* (Kuhn F.). Tome 1, rapport INRETS-CRESTA, juillet 1986. 11 réseaux de tramways et de métros légers en Europe (Kuhn F.). Tome 2. *Les réseaux de tramways et de métros légers (LRT) en Amérique du Nord* (David Y., Kuhn F.). Tome 3. *Les réseaux de transports urbains en France* (Kuhn F.). Tome 4.
2. *Light Rail Transit* (Proceedings of a National Conference). TRB 23-25/6/75, special Report TRB 161, 1975.
3. *Light Rail Transit: Planning and Technology*. Special Report TRB 182, 1978.
4. *Light Rail Transit* (LEA Transit Compendium). Vol. II, n° 5, 1975; vol. III, n° 5, 1976-77.
5. *Tramways of North America* (Taplin M.R.). Editeur: Light Rail Transit Association.
6. *Tramways of Western Germany* (Pagel M., Taplin M.R.). Editeur: Light Rail Transit Association.
7. *Tramways and Light Railways of Switzerland and Austria* (Buckley). Editeur: Light Rail Transit Association.
8. *Transports publics urbains de l'URSS*. Congrès UITP, Bruxelles, mai 1985.
9. *Etude des Transports intermédiaires en site propre*. RATP, direction des Etudes Générales, février 1982.
10. *Du tramway au métro léger* (Malterre P.). Extraits des n° 350 et 351 de la revue AFAC, publication METRAM.
11. *Le marché des matériels tramway et métro léger*. Etude METRAM pour le Ministère des Transports, 1984.
12. *Jane's Urban Transport 1985*. Publication JANE'S Publishing Company limited.
13. *Insertion et réalisation de l'infrastructure des métros légers dans le tissu urbain* (Bonz Manfred). 45^e Congrès UITP, Rio 1983. Commission 7.
14. *Urban Public Transportation: Systems and Technology* (Vukan R. Vuchic). Publication Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New-Jersey, 1981.
15. *Metro Planners Steer different Courses* (Jackson Chris). Revue Railway Gazette International, February 1986.