

# Transports guidés urbains et innovation technologique : la recherche de solutions nouvelles

par Claude SOULAS, chargé  
de recherches à l'INRETS - LTN (1)

En abordant l'innovation dans les transports guidés, l'auteur n'a pour objectif que de dresser un panorama général des grandes tendances en ce qui concerne l'évolution des systèmes et des composants, en se gardant d'aller trop loin dans la description des détails technologiques. Une partie importante de l'étude est consacrée aux solutions nouvelles qui ont débouché, mais quelques aperçus rapides sont également donnés sur des filières technologiques qui ont peu connu de succès, sur l'amélioration des transports guidés traditionnels et sur les perspectives d'avenir.

Le fait d'insister plus particulièrement sur ce que l'on a souvent appelé les « modes nouveaux » (qui englobent tous les transports du type VAL et autres systèmes automatiques) ne signifie pas que les transports guidés classiques n'ont pas eux aussi la possibilité de progresser, mais ce thème est mieux connu des lecteurs de *Transports urbains* dont deux récents numéros ont été consacrés aux tramways et aux métros. L'auteur se défend d'introduire une polémique dans une revue où de nombreux articles ont jusqu'à présent cherché à mettre en évidence les atouts des solutions tramway/métro léger, et il a jugé utile de commencer par un certain nombre de considérations générales pour montrer que les deux grandes filières souvent présentées comme concurrentes ont d'abord un certain nombre de points communs en tant que transports réunissant les trois qualificatifs suivants : collectifs, guidés, à traction électrique.

Le terme « transport guidé » est compris ici dans son sens le plus habituel, c'est à dire en élargissant le concept de transport ferroviaire ou transport sur rail dans la mesure où sont envisagés tous les types de sustentation-guidage possibles : roue ferrée/rail, pneumatique/rail ou piste, roues à enrobage, technique magnétique/etc. Cependant, contrairement aux véhicules sur pneumatiques intégralement guidés, certaines solutions hybrides actuellement très peu développées, telles l'autobus guidé, ne rentrent pas dans le cadre de cet article dans la mesure où la philosophie reste routière et que le guidage sert uniquement à réduire les emprises sur des tronçons délimités.

## 1. Contexte général

### 1.1. Rappel historique

En schématisant pour les besoins de l'exposé, et en laissant de côté les transports par bateau, les transports urbains de personnes peuvent se répartir en quatre grands groupes :

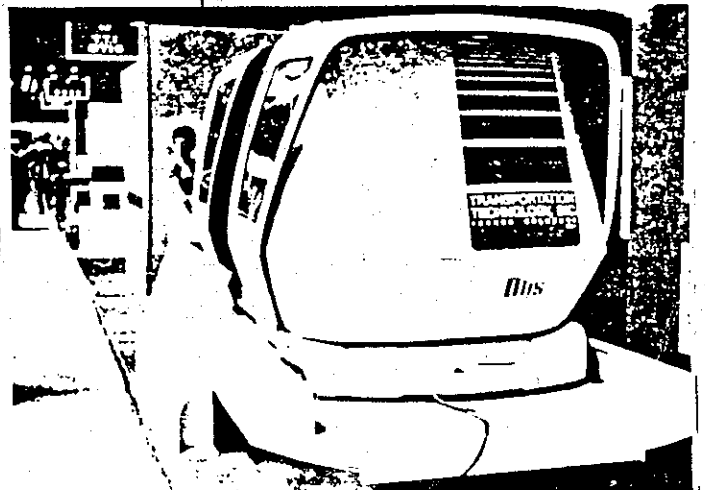
- les modes non motorisés : la bicyclette, la marche à pied qui reste importante en ville, avec quelques variantes marginales comme le patin à roulettes,
- les modes individuels motorisés : automobile, deux roues à moteur,
- les transports collectifs routiers : du type autobus et dérivés,
- les transports collectifs guidés : ces derniers ont été dans le passé bien représentés dans les villes de France, avec une certaine de réseaux de tramways qui n'ont malheureusement pas été modernisés et qui ont au contraire été peu à peu démantelés.

Pour un ensemble de raisons les modes individuels motorisés, essentiellement l'automobile, ont connu un essor important en ville en dépit de tous les inconvénients que l'on connaît. Sans chercher à savoir dans quelle mesure cet essor est une conséquence de la suppression des tramways ou au contraire jusqu'à quel point le déclin des tramways est conséquence de la volonté de favoriser l'automobile, nous pouvons constater que l'autobus n'a pas été en mesure de conserver une clientèle importante pour les transports collectifs. L'avantage de souplesse souvent avancé pour ce mode collectif routier s'est en fait retourné contre lui puisqu'il a dû se plier aux exigences de la circulation automobile et s'est souvent retrouvé englué dans la circulation générale.

Lorsque dans les années soixante l'incohérence de cette

situation est devenue flagrante, il est apparu de plus en plus nécessaire de développer des transports collectifs qui puissent rivaliser avec l'automobile par leur caractère attractif intrinsèque, puisqu'il n'était pas question de rééquilibrer le développement des quatre grands types de transport cités plus haut par une affectation judicieuse de l'espace urbain. Bien plus que la « folie » des inventeurs ou que la confiance inébranlable dans les technologies les plus révolutionnaires, il s'agit là d'une des raisons essentielles pour lesquelles les projets de petites cabines automatiques ont tant été à l'ordre du jour alors qu'il était irréaliste de vouloir les implanter dans les grandes villes en l'espace de quelques années.

Fig. 1. Il s'agit là d'une des raisons essentielles pour lesquelles les projets de petites cabines ont tant été à l'ordre du jour. Prototype du système TTI-Ortis présenté en 1973 (photo P. Altorre)



(1) Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité - Laboratoire des technologies nouvelles

Il reste quant même quelques retombées positives de ce qui a été souvent considéré comme un échec (par l'inadéquation entre l'ampleur des besoins et la réalité des produits obtenus au bout des premières années de développement), puisque plusieurs systèmes automatiques aux ambitions plus modérées ont vu le jour. Par ailleurs, ce n'est pas le propre des transports guidés d'avoir connu des espoirs en grande partie déçus à l'intérieur d'une échelle de temps donnée : en se limitant au seul secteur des transports, on peut constater qu'à la même époque que celle des « modes nouveaux » étaient lancées des recherches sur la pile à combustible ou sur le véhicule électrique routier à batteries, recherches qui ont connu jusqu'à présent un succès encore plus limité en matière d'applications concrètes, même s'il en découle des améliorations technologiques.

C'est dans ce (double) contexte général des villes vouées en grande partie à l'automobile et de l'absence de percée globale des « modes nouveaux » révolutionnaires que recommencent depuis quelques années à se développer des transports guidés urbains, que ce soient des nouveaux systèmes automatiques au cahier des charges maintenant mieux définis ou des systèmes traditionnels modernisés.

## 1.2 Avantages collectifs communs aux différents modes guidés

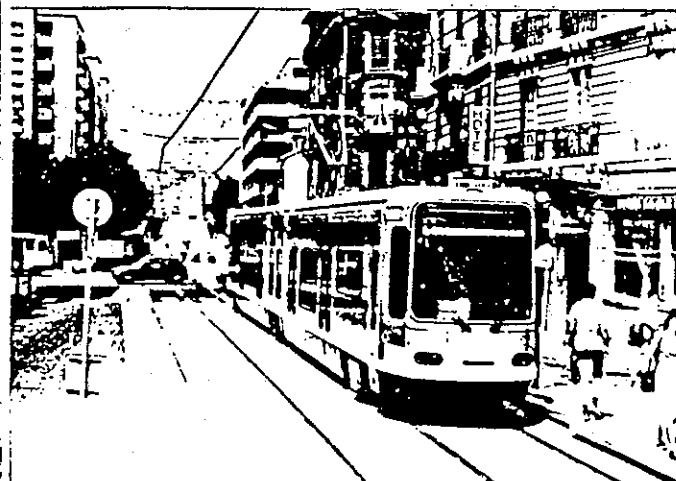
On pourrait résumer la situation par un raccourci rapide en disant que les transports guidés permettent d'économiser les biens les plus précieux en ville : l'espace, l'énergie, la qualité de l'air... et les vies humaines (y compris les blessures et souffrances), ceci plus encore que les autres transports collectifs, grâce à leur capacité et à leur performances.

La faible consommation d'espace rapportée au nombre de passagers transportés, évidente surtout pour les métros et les RER, mais significative aussi pour les autres systèmes, permet directement à un grand nombre d'usagers de se déplacer sur un espace restreint tout en permettant d'améliorer (voire de rendre possible) la circulation routière (automobiles, utilitaires, suffisant pour les modes non motorisés ainsi que pour des aménagements rendant agréable la vie en ville.

La faible consommation d'énergie rapportée au passager kilomètre transporté dépend de la nature du mode - mais aussi de son aptitude à économiser l'espace - et de son implantation, qui peut être plus ou moins indépendante de la circulation routière environnante. En effet, bien que la consommation réelle globale due à l'automobile a au contraire tendance à augmenter pour plusieurs raisons, dont l'augmentation du kilométrage et de la vitesse (aspect moins sensible en ville), mais aussi parce que la forte consommation d'espace de ce mode individuel induit des embouteillages

théorique ou conventionnelle des vitesses nouvelles diminue relativement depuis plusieurs années, la consommation réelle...

Fig. 2. "Les transports guidés ont une consommation unitaire relativement réduite, de l'ordre de 20 gep par passager-kilomètre transporté". Tramway de Grenoble (photo J.-H. Guétat)



facteurs de surconsommation. Les transports guidés ont non seulement une consommation unitaire relativement réduite, de l'ordre de 20 gep (2) par passager-kilomètre transporté mais de plus, ce sont actuellement - mis à part les trolleybus et les très rares véhicules électriques - routiers à batterie en circulation - les seuls moyens de transport à être indépendants des hydrocarbures et à consommer de l'électricité qui peut être d'origine très diverse (hydraulique, nucléaire, charbon, gaz, fioul lourd, etc.)

Certes, dans la conjoncture internationale actuelle de bas cours du pétrole, le thème de la maîtrise de l'énergie est moins à la mode qu'il y a quelques années, ce qui ne doit pourtant pas conduire à l'oublier compte tenu que :

- Il n'est pas certain que cette conjoncture reste toujours aussi favorable, et la facture pétrolière reste toujours le poste n° 1 des importations ;
- la croissance du secteur des transports dans la consommation totale - qui atteint en France la moitié de la consommation finale de produits pétroliers et les deux tiers aux Etats-unis - induit un déséquilibre gênant entre les demandes de produits légers et de produits lourds ; il est donc beaucoup plus intéressant d'économiser les carburants automobiles, essence ou gazole, que les produits lourds ;
- la pollution de l'air dépend en premier lieu de la quantité d'énergie consommée, même s'il n'y a pas de proportionnalité pour tous les types de polluants et il s'agit là d'un thème qui est de plus en plus à l'ordre du jour.

Du fait de la nature très diverse des polluants (poussières, particules, plomb, hydrocarbures imbrûlés, oxydes d'azote, monoxyde de carbone, gaz carbonique, etc...) la pollution de l'air due à la circulation routière - qui est de loin la source la plus importante en milieu urbain - a des conséquences directes et indirectes à plusieurs niveaux : odeurs et fumées visibles, impact direct sur la santé des habitants en ville, impact direct sur la végétation et les bâtiments urbains, contribution au phénomène des précipitations acides qui, parmi d'autres conséquences, participe au dépérissement des forêts ; enfin, l'augmentation de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère fait craindre à de nombreux experts un réchauffement excessif de la planète dans les quelques décennies à venir.

La complexité de cette situation montre que, même en considérant que des mesures technologiques pourront, dans les prochaines années, réduire dans une certaine proportion l'émission de certains des polluants automobiles, la contribution des transports guidés à la réduction de la pollution atmosphérique à court, moyen ou long terme ne doit pas être sous-estimée. Le fait que les transports guidés consomment de l'électricité est bien sûr un facteur favorable : même si l'on admet que la production d'électricité provoque aussi une pollution, cette dernière est à la fois très faible du fait de la quantité d'énergie consommée/n'est pas concentrée dans les zones d'habitation.

Enfin le niveau de sécurité des transports guidés est globalement très bon, tant pour les passagers que pour les autres usagers de la voirie, alors que la circulation routière est responsable en France de plus de 150 000 blessés par an pour le seul milieu urbain.

Il est bien évident que tous les avantages collectifs cités ci-dessus peuvent se concrétiser d'autant mieux que les systèmes considérés peuvent attirer vers eux une partie significative des déplacements. C'est à ce niveau qu'interviennent les performances du système, les possibilités d'affectation d'espace au niveau du sol ou la mise en site propre intégral, l'automatisation plus ou moins poussée... et les conditions de la « concurrence » avec les autres modes.

L'innovation technologique dans le domaine des transports guidés peut se faire soit par la mise au point de nouveaux systèmes, soit par le développement de nouveaux composants, deux démarches qui se rejoignent, et nous commencerons par les systèmes.

(2) Gramme équivalent-pétrole

## 2. Nouveaux systèmes : PRT et systèmes automatiques guidés urbains

et à la recherche de "modes nouveaux".  
Parmi ceux-ci, le concept de PRT... <sup>lignes oubliées</sup>

### 2.1 Les débuts

Il y a une vingtaine d'années, à l'époque où de nouvelles idées fusaient tous azimuts, il y avait certes quelques tentatives pour mettre au point de nouveaux composants de sustentation (par exemple le coussin d'air qui a aussi fait quelques essais dans le domaine urbain), de motorisation (par exemple le moteur linéaire), de guidage, etc., mais la mode était surtout à l'invention de nouveaux concepts de PRT, *Personal Rapid Transit*, né aux États-Unis, a fait couler beaucoup d'encre. L'objectif était de concurrencer l'automobile sur son propre terrain en mettant au point un moyen de transport public qui ait toutes les qualités de confort individualisé, de rapidité, d'absence de rupture de charge, que la voiture particulière... tout en évitant les embouteillages et en ayant les mêmes avantages que les transports en commun pour la collectivité. Dans son acception la plus stricte, le concept de PRT supposait donc de réunir simultanément les trois caractéristiques suivantes :

- la programmation par le passager de la destination des cabines automatiques, afin d'obtenir un service origine-destination sans rupture de charge. Ceci nécessitait des bretelles de raccordement aux carrefours et une gestion des véhicules par ordinateur pour permettre la réalisation des itinéraires choisis ;

- un service direct sans arrêts intermédiaires, ce qui nécessitait donc des stations en dérivation ;
- une taille personnalisée des véhicules ou cabines, comprenant d'une à six places toutes assises.

Peu de système réunissant cet ensemble de caractéristiques ont atteint le stade de l'expérimentation d'un prototype en vraie grandeur. Parmi ceux-ci on peut citer le CVS japonais, le *Cabinentaxi* allemand (en tant que version la plus ambitieuse de la famille des « C-Bahn ») et *Aramis* tel qu'il était conçu au début des années 1970, à l'époque des essais sur le site d'Orly, c'est à dire avant d'évoluer vers une version simplifiée non-PRT.

Ces systèmes, qui ont été étudiés et testés dans les pays du monde les plus avancés au point de vue technologique, n'ont pas connu de succès commercial. En prenant un peu de recul, il apparaît évident qu'une implantation à l'échelle de toute une ville, car l'avantage du service direct d'un PRT n'est important que si la zone d'implantation est assez grande, nécessite un réseau d'infrastructures coûteuses et un parc de véhicules considérable et d'une gestion difficile. On pourrait dire aussi que ces systèmes étaient d'autant plus irréalistes au plan économique qu'il n'était pas envisagé de leur affecter des sommes aussi colossales que celles qui sont consacrées globalement à l'automobile de manière publique (infrastructures, espaces urbains, gestion de la circulation, coûts sociaux, etc...) ou privée (achat et entretien du matériel roulant, carburant).

### 2.2 Le concept de système automatique guidé urbain

Le bruit fait autour de ces PRT révolutionnaires, susceptibles d'enflammer facilement l'imagination, a masqué la naissance de manière diffuse du concept de système automatique guidé urbain, qui inclut certes les PRT, mais également tous les autres systèmes dans lesquels les véhicules fonctionnent de manière entièrement automatique sans nécessiter de personnel pour des raisons techniques, ni à bord ni en station ; on parle alors d'*automatisme intégral*. Dans les cas particuliers où du personnel subsiste a demeure pour des raisons de relation avec le public, il n'a pas fonction opérationnelle.

Il est clair qu'en règle générale un tel concept nécessite l'implantation d'une ligne en site propre intégral, que ce soit en aérien, en souterrain, au sol avec des carrefours dénivelés ou en tranchée ouverte. Parmi les avantages offerts en contrepartie de cette contrainte d'insertion, nous n'affirmerons pas que les coûts d'exploitation seront réduits par l'absence des conducteurs (partiellement remplacés par d'autres types de postes), car cela dépend de la configuration

Fig. 5. Le BART, à San Francisco, premier système automatique intégral, a été mis en service en 1967, non sans quelques difficultés dues à la fiabilité des équipements.



(Jane's 1986 p. 311)

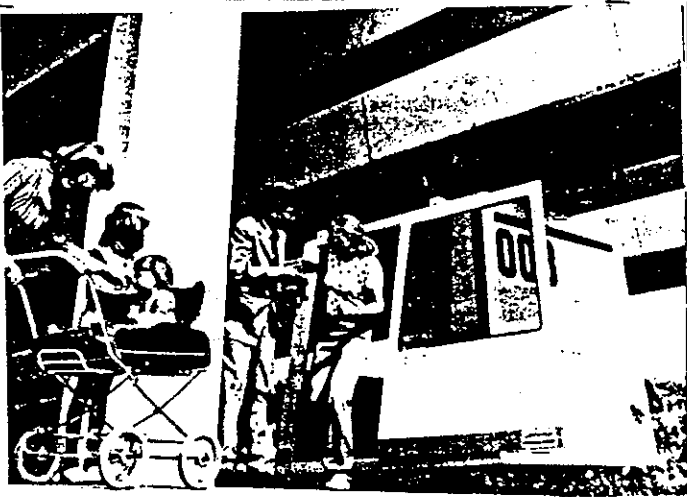
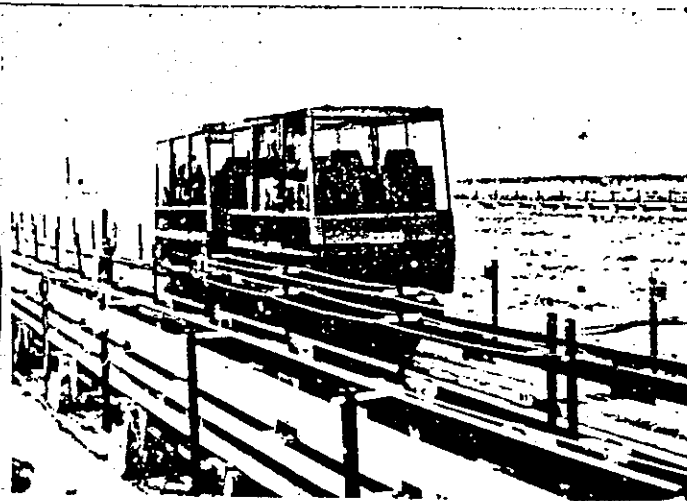


Fig. 3. Parmi les premiers systèmes expérimentés, l'une des variantes du *Cabinentaxi*, à Hanovre (photo Demag-MBB)

Fig. 4. Le système *Aramis*, de l'atra, à ses débuts en 1974 sur la voie d'essais d'Orly (photo P. Walterre)



TU 29 p. 28 fig. 23

TU 29 p. 65 fig. 4 bas de la photo

de la ligne et du nombre de véhicules en service, mais nous remarquerons que la qualité de service peut être améliorée.

- Des points de vue de la vitesse commerciale, de la régularité et de la fréquence de passage, la qualité de service n'est pas forcément supérieure à celles des métros classiques qui sont, eux aussi, en site propre intégral et partiellement automatisés, même si le cas échéant l'automatisme intégral permet de gagner quelques secondes supplémentaires sur l'intervalle ; mais les systèmes automatiques guidés ont pour objectif d'apporter cette qualité de service élevée sur des lignes où le débit ne justifie pas l'implantation d'un métro classique. L'absence de conducteur permet dans ce cas de choisir des véhicules de capacité plus faible se succédant à cadence plus élevée. Par ailleurs, la plus faible taille des véhicules permet de concevoir des infrastructures en site propre moins coûteuses : plus faible gabarit en tunnel, ligne aérienne plus légère. Il est certain que ce dernier aspect se concrétise de manière plus ou moins nette selon les systèmes, il s'agit là cependant d'une tendance générale.
- L'automatisme intégral apporte une grande souplesse d'exploitation, notamment pour le choix des heures d'insertion et de retrait des véhicules tout au long de la journée. L'amplitude du service journalier peut être grande : voir vingt-quatre heures sur vingt-quatre heures dans des cas particuliers sans poser des problèmes vis-à-vis des grilles de présence des conducteurs. Cet aspect, ajouté à la

Possibilité du choix d'une fréquence de passage élevée même en heure creuse et pendant le week-end, est un atout supplémentaire pour améliorer l'attractivité des transports collectifs.

Nous essaierons de voir dans la suite comment ce concept de système automatique a réussi à naître et à se concrétiser à travers plusieurs générations de systèmes... avant peut-être de perdre une partie de son originalité dans le futur maintenant qu'il existe des projets d'automatisation intégrale de métros classiques. Il convient d'abord de remarquer que des métros comme celui de Paris sont déjà depuis plusieurs années partiellement automatisés puisque le pilotage automatique décharge le conducteur des tâches de commande de la vitesse, et qu'il existe un poste de commande centralisé de l'exploitation. Du point de vue technique, indépendamment du type de véhicule et de voie choisis, un système automatique guidé se distingue par une automatisation un peu plus poussée qui permet de remplacer les tâches normalement effectuées par le conducteur : autorisation de fermeture des portes, reprise en conduite manuelle en cas d'incident. Ceci se traduit concrètement par des redondances, des télécommandes et télésurveillances, des dispositifs de sécurité supplémentaires, etc. Selon les systèmes, le pilotage automatique et le dispositif anticollision peuvent être analogues à celui du métro de Paris ou être d'un type différent.

### 3. L'évolution des systèmes automatiques guidés

#### 3.1. Les systèmes américains de première génération

Dès les années soixante-dix, les États-Unis ont été une pépinière pour les nouveaux systèmes automatiques. En l'espace d'une dizaine d'années, une vingtaine d'implantations ont eu lieu, le plus souvent sur des distances assez limitées et dans un environnement particulier : parcs d'exposition, aéroports ou autres grands complexes fermés. Il ne s'agissait pas encore de véritable transport en milieu urbain, mais le fonctionnement dans un environnement moins sévère a permis la constitution de bancs d'essai pour la circulation de petits véhicules sans conducteurs.

Deux systèmes se sont distingués par l'ampleur du site, le nombre élevé de véhicules et l'existence de stations en dérivation, sans qu'il s'agisse toutefois de véritables PRT : l'*Airtrans* de l'aéroport de Dallas Fort Worth et le système *Boeing* de l'université de Morgantown. Dans ce dernier cas il y avait déjà une petite amorce de transport urbain puisqu'il s'agissait de relier l'université à la ville.

Comme les véritables PRT se sont révélés quasi inexistantes en ce qui concerne les réalisations concrètes, ce terme a souvent été employé pour désigner des systèmes plus ou moins différents, bien que la dénomination GRT, *Group Rapid Transit*, ait été inventée pour désigner des systèmes possédant certaines caractéristiques des PRT, mais utilisant des véhicules de taille moyenne pouvant contenir jusqu'à quelques dizaines de personnes.

En fait, un amalgame a souvent été fait entre les concepts PRT, GRT et système automatique guidé ou AGT (*Automated Guideway Transit*). Ce qui était de nature à créer une confusion d'autant plus gênante qu'à une certaine époque l'échec des PRT a eu tendance à jeter un discrédit sur l'ensemble des autres transports automatiques. Il apparaît maintenant clair que le fossé entre un PRT et un système automatique guidé « normal » (sans service direct personnalisé) est infiniment plus grand qu'entre un système automatique guidé et un transport urbain guidé plus classique.

Pour en terminer avec la terminologie, les systèmes automatiques américains, qui ont tous en commun quelques

Fig.6. Le système *Airtrans* en service à l'aéroport de Dallas Fort Worth (coll. INRETS)

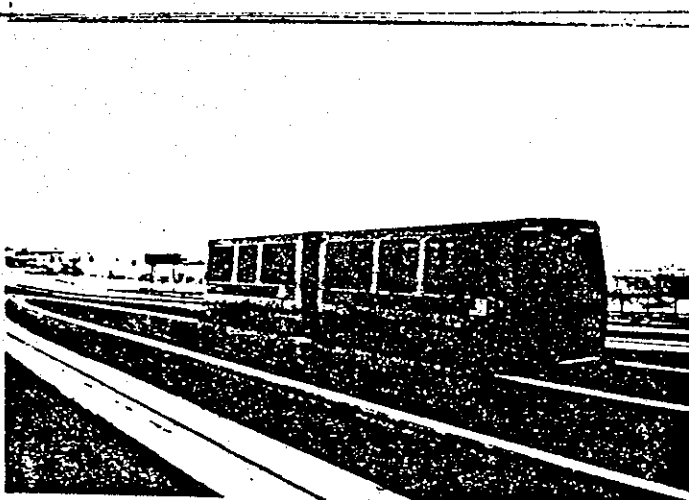
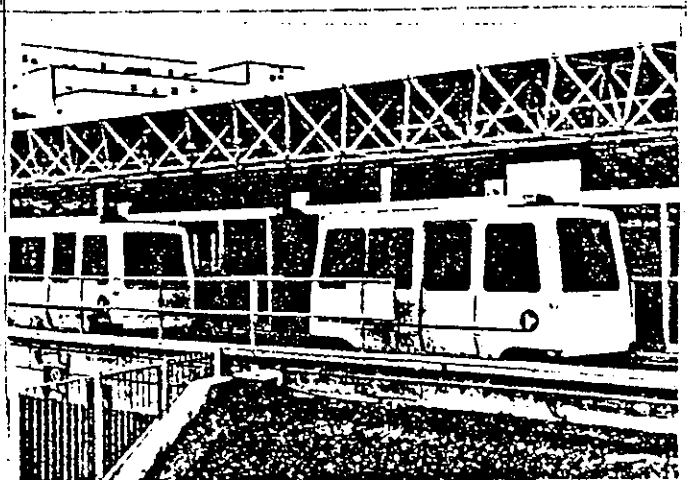


Fig.7. Cabines du système *Boeing* assurant la liaison entre l'université de Morgantown et la ville (coll. INRETS)



grandes tendances : véhicules de taille moyenne, circulant le plus souvent sur pneumatiques (très rarement sur coussin d'air) en voie aérienne sont généralement appelés *People Mover* ou *Automated People Mover* (APM). Ceux qui sont destinés à être installés en centre ville sont intitulés *Downtown People Mover* (DPM), d'où le projet DPM qui sera évoqué par la suite avec les systèmes américains de deuxième génération.

### 3.2. Les systèmes japonais

Plusieurs systèmes automatiques guidés sont en service au Japon. En mars 1981 les mises en service du KNT à Kobe et du NTS à Osaka ont permis de franchir une étape supplémentaire en équipant des sites plus significatifs que les sites américains. C'étaient de véritables dessertes urbaines, mais quand même dans un contexte un peu particulier puisque dans un cas comme dans l'autre il s'agissait de desservir une île artificielle et d'effectuer la liaison avec un système ferré plus lourd. Les lignes, de longueurs comparables, ont respectivement neuf et huit stations, avec des débits offerts de 10 000 à 12 000 passagers par heure et par sens en pointe.

Les possibilités de l'automatisme intégral n'ont pas été exploitées à fond pour ces premiers systèmes japonais car l'intervalle de passage ne descend pas au dessous de 2 à 3 mn et il a été décidé, pendant une période transitoire de plusieurs années, de laisser un agent d'accompagnement dans chaque rame pour des raisons psychologiques. De ce fait, et du fait d'un débit plus important — à l'opposé des *People Mover* américains se caractérisant par des véhicules assez courts —, ces systèmes japonais comprennent des rames relativement longues pour un système automatique.

Depuis 1981 plusieurs autres systèmes automatiques japonais ont été mis en service.

### 3.3. Le VAL

Peu de temps après les premiers systèmes japonais, en 1983, le VAL a été le premier système automatique guidé à être implanté sur une ligne importante spécifiquement urbaine, dans l'agglomération lilloise : traversée du centre ville et des faubourgs, puis liaison aux extrémités avec un complexe universitaire et un centre hospitalier. C'est pour cette raison que le VAL de Lille a été considéré comme le premier métro dans le monde à fonctionner en automatisme intégral.

En fait, le VAL est un système automatique guidé qui peut connaître divers types d'applications, comme le montrent d'ailleurs les projets en cours ou déjà réalisés :

- métro léger automatique : deux premières lignes en service à Lille (lignes 1 et 1 bis), première ligne décidée à Toulouse, lignes envisagées dans d'autres villes de France comme Bordeaux, Rennes, etc. ;
- métro automatique à plus gros débit : projet de Taïpeh ;
- desserte de centre ville : premier tronçon en service à Jacksonville (USA) au printemps 1989 ;
- desserte interne d'aéroport : en construction à Chicago ;
- rabattement vers un axe ferroviaire lourd, par exemple pour desservir un aéroport : en construction pour la liaison Antony - Orly.

Sans nous étendre outre mesure sur le VAL qui est maintenant assez bien connu, nous remarquerons que c'est actuellement le système automatique guidé qui a le plus de succès dans le monde. Il a bien sûr fallu attendre quelques années que le VAL fasse ses preuves à Lille sur la première ligne avant que d'autres contrats puissent être signés, notamment à l'exportation. La diversité des applications possibles montre que le VAL, en tant que système (en l'occurrence système automatique guidé), ne peut pas être défini par un gabarit ou une gamme de débits. Ainsi le VAL a-t-il été conçu à gabarit étroit (2,06 m) à Lille dans le but de réduire légèrement les emprises, en particulier le coût des tunnels.

Par contre, pour les projets américains qui se caractérisent par une ligne aérienne sans problème d'espace, le gabarit en

NTS

diapo

Fig.8. Rare du système japonais NTS mis en service en 1981 à Osaka (coll. INRETS)

largeur a été porté à 2,56 m. Pour ces mêmes projets, et afin d'offrir une bonne fréquence de passage malgré un débit limité, les véhicules circulent de manière isolés, alors qu'ils sont en éléments doubles indissociables à Lille et que les infrastructures (y compris les quais des stations) sont dimensionnées pour accueillir ultérieurement des rames de deux éléments si l'augmentation du trafic le justifie. Les rames peuvent être encore plus longues pour les métros à forte capacité comme celui de Taïpeh.

Le VAL de Lille, à roulement sur pneumatique comme les systèmes japonais, se distingue de ces derniers par la volonté clairement affichée dès le départ de n'avoir aucun personnel, aucun accompagnateur à demeure dans les véhicules, ce qui va de pair avec des rames plus courtes et un intervalle minimal de 60 secondes en exploitation effective (contre environ 90 secondes au métro de Paris), obtenu avec un temps de stationnement maximal de 30 secondes à la station la plus chargée. Le VAL doit sans doute son succès technique au fait qu'il n'est pas « révolutionnaire », c'est-à-dire que c'est un pas d'innovation supplémentaire par rapport aux systèmes existants, mais les composants technologiques sont en grande partie dérivés de ceux qui sont en service par ailleurs : moteurs à courant continu classique, pilotage automatique assez peu différent de celui du métro de Paris. Parmi les caractéristiques propres nous pouvons quand même citer :

- le roulement sur pneumatique à l'aide d'essieux à deux roues porteuses et roulettes d'aiguillage centrales (au lieu de

Fig.9. Le VAL de Lille a un gabarit réduit (2,06 m) car la faible capacité unitaire est compensée par l'augmentation des fréquences de passage permise par l'automatisme intégral

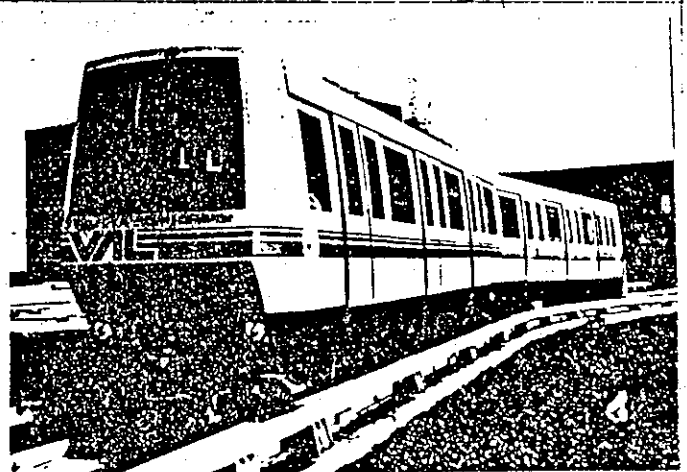




Fig. 10. Afin d'éviter des chutes de passagers à l'arrivée d'un train, le métro d. Lille est équipé de portes palières dont l'ouverture et la fermeture sont synchronisées avec celles du train (photo F. Seauclaire).

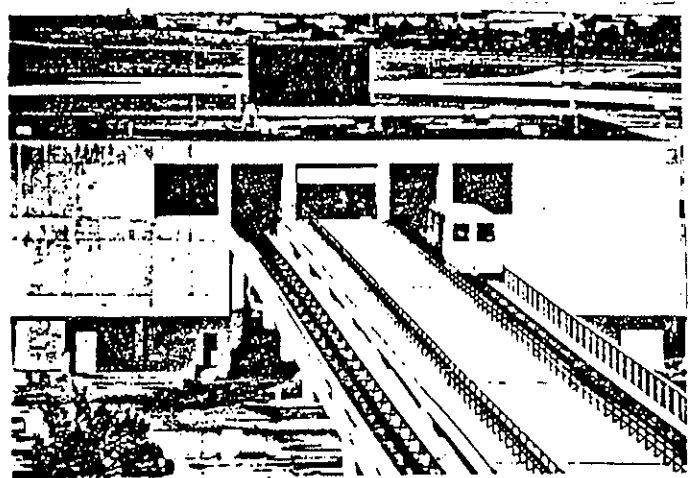


Fig. 11. Le système Westinghouse se distingue par quatorze réalisations dans la période 1970-90. Ci-dessus, desserte de l'aéroport de Tampa (coll. INRETS).

bogies à quatre roues porteuses dérivés des bogies fer pour les métros sur pneus classiques) ;

- quelques originalités dans le dispositif anti-collision ;
- la réalisation de nouvelles fonctions comme l'accostage et le poussage à faible vitesse d'une rame en panne ;
- l'existence de portes palières fermant le quai, portes dont l'ouverture et la fermeture sont synchronisées avec celles des portes du véhicule, afin d'éviter les chutes de passagers à l'arrivée du véhicule, d'éviter l'entraînement d'un passager lors du démarrage (ce qui est théoriquement détecté par le conducteur dans un système classique), et accessoirement d'offrir un meilleur confort en station ; il s'agissait là d'une première en France mais des portes palières existaient déjà sur certains systèmes américains (3). Il était apparu important d'offrir cette garantie totale pour le premier système sans conducteur fonctionnant en France, mais cet équipement n'est pas forcément retenu par tous les systèmes en automatisme intégral.

Au fur et à mesure des nouvelles applications, le VAL peut continuer d'évoluer quant à ses composants technologiques ; ainsi par exemple, pour la ligne 1 bis de Lille mise en service début 1989, les équipements de traction comprennent des hacheurs à GTO (thyristors à extinction commandée par la porte de la voie).

### 3.4. Les systèmes américains de deuxième génération

Vers la fin des années soixante-dix, le projet DPM *Downtown People Mover*, assez ambitieux, prévoyait d'équiper le centre des grandes villes américaines avec des systèmes automatiques mais, à la suite des restrictions de crédit de l'administration Reagan, seules trois villes ont pu être équipées pendant la décennie 1980 : Miami, Détroit et Jacksonville. Bien qu'il s'agisse là cette fois non plus de complexes fermés mais de dessertes en milieu spécifiquement urbain, ces trois sites ont une moindre envergure que le VAL de Lille tant par la longueur de la ligne que par le débit de passagers. Ceci est dû en partie au fait que les transports collectifs sont peu ancrés dans les mœurs aux États-Unis avec, de plus, des problèmes d'insécurité — particulièrement aigus dans certaines villes comme Miami — qui n'incitent pas à l'utilisation de tels systèmes, de la même manière qu'ils dissuadent les habitants de fréquenter les centres ville à certaines heures.

Le système Westinghouse de Miami, mis en service en 1986, a été le premier système opérationnel en milieu spécifiquement urbain aux États-Unis, sur une ligne de 3,2 km en boucle.

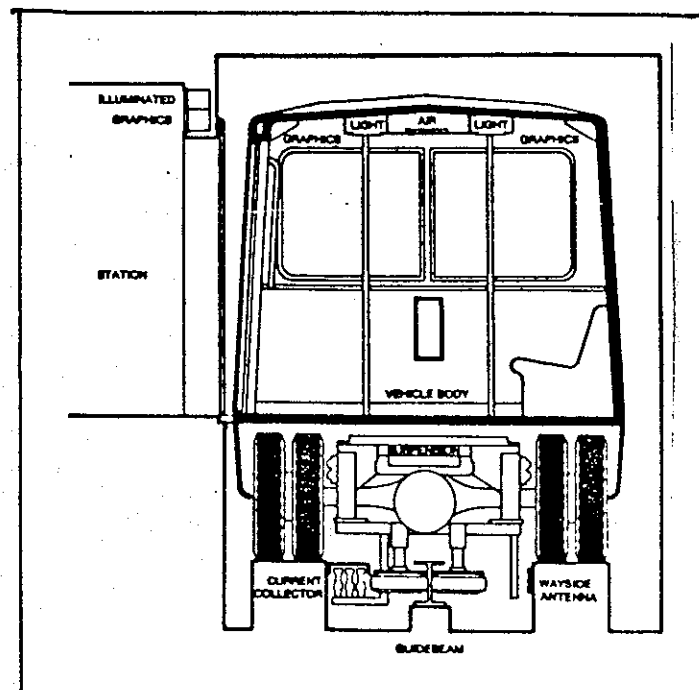
(3) Des portes palières existent aussi, pour des raisons tout-à-fait différentes, dans certaines stations à grande profondeur du métro de Leningrad (N&F).

fermée, intégralement aérienne en voie double avec neuf stations. La technologie est dérivée de celle des nombreux systèmes Westinghouse déjà en service dans des aéroports. Le roulement est sur pneumatiques avec des essieux comportant des roues jumelées ; une originalité réside dans le guidage central à l'aide de roues horizontales à bandage prenant appui sur une poutre métallique située en-dessous du plan de roulement. Une autre particularité technique est la captation de courant en 600 V triphasé à l'aide de quatre rails (3 phases et la terre), deux de ces rails étant utilisés par ailleurs pour envoyer les fréquences servant à la commande du système, au lieu d'avoir un tapis de voie comme sur le VAL. La vitesse de croisière est de 43 km/h.

Le système Westinghouse, qui se distingue par un grand nombre de réalisations (14 sites équipés pendant la période 1970-1990, essentiellement dans des aéroports américains) n'a connu jusqu'à présent que le site de Miami comme implantation urbaine, mais une nouvelle desserte urbaine est prévue à Los Colinas, ville nouvelle située entre Dallas et l'aéroport de Fort Worth, avec quelques améliorations : véhicule plus léger, aiguillage rotatif.

*à pivotement de la voie*

Fig. 12. Aéroport de Seattle-Tacoma : coupe du véhicule Westinghouse et de son système de roulement et de guidage (doc<sup>t</sup> Westinghouse).



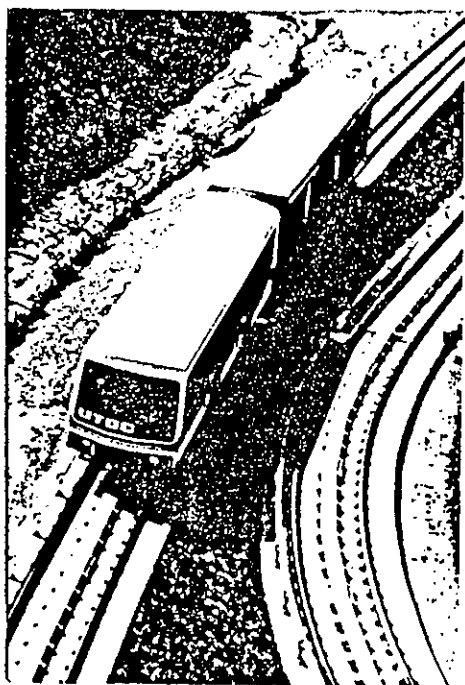


Fig.13. Le système canadien UTDC à moteur linéaire plat (coll. INRETS)

Ce système est le seul système américain de première génération qui ait évolué pour connaître une implantation urbaine, mais depuis lors un autre système automatique nord-américain est apparu au Canada, que l'on retrouve dans la littérature sous diverses appellations : ICTS, *Intermediate Capacity Transit System*, ou UTDC, *Urban Transportation Development Corporation* (du nom de la première société qui a développé le système), ou ALRT, *Advanced Light Rail Transit*, qui réutilise la technologie des véhicules fonctionnant avec conducteurs à Scarborough. L'originalité technologique réside dans l'utilisation d'un moteur linéaire, en association avec un bogie ferroviaire à essieux orientés, avec des roues de faible diamètre (46 cm), afin d'abaisser le gabarit en hauteur ; le pilotage automatique est le dispositif *SelfTRAC* développé en Allemagne.

*SelfTRAC bdc*

De même que les premiers systèmes américains, puis les systèmes japonais de Kobe et Osaka, puis le VAL de Lille, l'ICTS a permis de franchir une nouvelle étape de l'évolution des systèmes guidés, puisque c'est la première fois que le roulement sur fer est utilisé. La première implantation a eu lieu sur une ligne urbaine de 22 km à Vancouver en 1985, le *Skytrain*, et la deuxième à Détroit sur une boucle de 4,7 km en voie simple en contre ville en 1987, le CATS, ou *Central Automated Transit System*. Il convient quand même de mentionner les problèmes d'usure et de bruit rencontrés sur le *Skytrain* de Vancouver, du fait de ce nouveau type de bogie orientable, ce qui montre l'intérêt de poursuivre des recherches sur de nouveaux dispositifs d'orientation des essieux.

Enfin la troisième ville américaine, Jacksonville, a été équipée avec un premier tronçon de VAL au printemps 1989.

Tableau 1. Quelques exemples de systèmes automatiques guidés urbains.

Système	Airtrans	Morgantown People Mover	CATS (ICTS)	Miami DCM	VAL	Poma 2 000	NTS	KNT	H-Bahn
Constructeur	Vought Corporation	Boeing	UTDC (Canada)	Westinghouse Electric Corporation	Matra-Transport	SGTE	Nirigata (Licence Airtrans)	Kawasaki	Duewag-Siemens
Pays	États-Unis	États-Unis	États-Unis	États-Unis	France	France	Japon	Japon	Allemagne (1)
Site									
Implantation	Aéroport	Morgantown	Détroit	Miami	Lille	Laon	Osaka	Kobe	Dortmund
Date de mise en service	1974	1975	1987	1986	1983 (1982 (3))	Début 1989	1981	1981	1985 (1984 (3))
Longueur de voie (km)	21 (simple)	6,3 (simple)	4,7 (simple)	3,2 (double)	12,7 (double)	1,5 (mixte)	6,9 (double)	6,4 (4)	1,3 (simple)
Nombre de stations	53	5	13	10	17	3	8	9	2
Véhicules									
Nombre de véhicules par rame	2	1	1 ou 2	1	1 ou 2 éléments doubles	1	4 ou 6	6	1
Capacité maximale	49	21	94	112	104	35	75	75	53
Nombre de places assises	16	8			44 + 24 (2)	12	22	24	20
Longueur (m)	6,8	4,7 AT	12,7	11,9	12,7	4,9	8	9,1	9,2
Largeur (m)	2,2	2	2,5	2,8	2,06	2,2	2,25	2,35	2,08
Masse à vide (kg)	6 350	4 000	13 800	12 500	29 600	3 500	10 500	9 000	7 300
Performances									
Période minimale possible (s)	27	15	60	100	60	155	> 90	> 85	138
Débit maximal (passagers par heure et par sens)	8 000	5 000	14 000	5 200	12 000 ou 24 000	800 (plus sur d'autres sites)	12 000	10 000	1 300 (plus sur d'autres sites)
Vitesse (km/h)	27	48	50	43	60 (maxi. 80)	36	60	70 maxi.	50
Pente maximale admissible pour le système (%)	8	10	14	10	7 (y compris avec poussage)	15	7	10	5

(1) République fédérale d'Allemagne ; (2) strapontins ; (3) exploitation expérimentale ; (4) 2,9 km double ou 3,5 km simple.

augmenter de 7 m la hauteur du tableau en ajoutant 7 fois 1 m

## 4. L'évolution des composants

Avant de compléter le tour d'horizon des systèmes automatiques guidés par des systèmes de technologies diverses qui n'apparaissent pas dans l'évolution chronologique précédente — recoupée avec les grandes tendances rencontrées dans les principaux pays —, il apparaît utile d'insister sur les possibilités d'évolution technologique des principaux composants. A l'inverse de la démarche consistant à rechercher de nouveaux concepts de transport pouvant le cas échéant déboucher sur des « modes nouveaux », il s'agit d'examiner dans quelle mesure les améliorations apportées par l'évolution des technologies peut profiter aux systèmes automatiques guidés ou aux systèmes guidés classiques. Nous serons obligés de nous limiter à un bref aperçu.

### 4.1. Les automatismes

Il y a maintenant une tendance générale dans le monde à utiliser des microprocesseurs non seulement pour des fonctions de commande, mais également pour des fonctions de sécurité. Dans ce dernier cas on peut envisager :

- des microprocesseurs travaillent en parallèle avec comparaison des résultats : c'est le cas du dispositif allemand *SeITRAG* testé sur le métro de Berlin et cité précédemment pour son utilisation sur l'ICTS canadien ;
- le monoprocesseur codé, pour lequel l'information est codée avec une redondance élevée. C'est le cas du dispositif français *SACEM* — *Système d'Aide à la Conduite, à l'Exploitation et à la Maintenance* — prévu pour le pilotage automatique de systèmes avec conducteurs comme le RER (afin d'augmenter les fréquences de passage), ou pour réaliser un automatisme intégral comme sur la ligne D du métro de Lyon ;
- le microprocesseur autotestable : des recherches ont été engagées en France sur ce thème par l'INRETS-CRESTA et l'IMAG de Grenoble.

### 4.2. Sustentation et guidage

Jusqu'à ces dernières décennies le roulement sur fer était la solution universellement utilisée — voire la seule — pour assurer la sustentation et le guidage des transports guidés pour les raisons suivantes : robustesse, réalisation simultanée de la sustentation et du guidage, simplicité de l'aiguillage, faible consommation d'énergie. Le roulement sur pneus est apparu d'abord avec les métros sur pneus comme celui de Paris, sur trois lignes, et ses dérivés, où la structure d'un bogie fer est conservée pour les aiguillages et pour la sécurité en cas de crevaisson, et où le rail classique maintenu en plus

des pistes de roulement permet de réaliser des circuits de voie traditionnels.

Mais c'est avec l'apparition des systèmes automatiques guidés que de nouvelles solutions de roulement sur pneus ont été recherchées, sans conserver la structure classique des bogies : c'est le cas de la plupart des systèmes étudiés en France (*VAL*, *Poma 2 000*, prototype d'*Aramis*), au Japon et aux Etats-Unis (*Westinghouse* et nombreux autres systèmes de première génération). Par contre les systèmes étudiés en Allemagne (*H-Bahn*, *M-Bahn* pour partie, *C-Bahn* qui n'a connu qu'une seule application sur un site hectométrique) et le système français *SK* ont choisi des roulettes à enrobage dur (par exemple polyuréthane) pour la sustentation et le guidage.

Les avantages avancés en faveur du roulement sur pneus sont les suivants : réduction du bruit et des vibrations, amélioration de l'adhérence — qui dépend en fait également de la nature de la piste de roulement —, allègement. Mais il n'est bien sûr pas question de chercher à trouver une quelconque supériorité du pneu par rapport au fer, ou vice versa, d'autant plus que chacune des deux technologies est susceptible d'évoluer, et d'autant plus que le choix du type de sustentation dépend du contexte général. Ainsi, pour une implantation sur viaduc, notamment métallique, l'aspect bruit pourra être plus décisif en faveur du pneu. A l'inverse, certaines technologies se marient très bien avec le roulement sur fer : la traction par moteur linéaire bénéficie d'une meilleure précision pour le maintien d'un entrefer suffisamment faible, tout en éliminant le besoin de bonnes conditions d'adhérence.

Ces dernières considérations nous amènent à aborder les possibilités d'amélioration du roulement sur fer. Sans sous-estimer les améliorations déjà apportées en conservant le concept du bogie traditionnel, notamment vis-à-vis de la réduction du bruit (pose élastique des voies, amélioration du roulement, etc.), il convient de remarquer qu'il est difficile d'éliminer totalement bruit et usures dans les courbes. L'orientation des essieux par le seul effet bicône, remarquable par sa simplicité, à la vitesse maximale et une orientation parfaite dans les courbes à très faible rayon. Cette constatation a amené un certain nombre de recherches sur l'orientation des essieux. Nous avons déjà évoqué au § 3.4. le bogie de l'ICTS (ou UTDC) de Vancouver ; le principe du métro BOA mis au point par la RATP concerne, lui, des essieux à roues indépendantes qui s'orientent par rapport à la position de la barre d'attelage.

Un autre principe a été inventé par l'INRETS-LTN : l'essieu *ERIOM*, ou *Essieu à Roues Indépendantes et Orientation Magnétique*, pour lequel la référence pour mesure de position et pour réaction des aimants peut être un induit de moteur

ne permet pas d'offrir à la fin une très bonne stabilité

Fig.14. Deux variantes de sustentation-guidage du système allemand *C-Bahn*, qui n'a connu qu'une seule application hectométrique (coll. INRETS)

Fig.15. Innovation dans le domaine du guidage : essai par la RATP d'une rame "SDA" à roues indépendantes orientées par la barre d'attelage (photo RATP)



linéaire ou tout autre rail. Ce principe a été testé en simulation sur roue de ~~la~~ Grenoble et les résultats satisfaisants concordent tout-à-fait avec des simulations. La description, bien trop sommaire, de ces innovations a pour seul but de montrer que de nouvelles voies de recherche existent pour améliorer le roulement sur fer.

La sustentation par coussin d'air n'est pas totalement abandonnée puisque la navette Otis à traction par câble, construite pour l'instant en trois exemplaires dans le monde, utilise ce principe, avec toutefois une technologie différente de celle de l'Aérotrain : chaque véhicule est sustenté par 24 petits coussins en forme de cercle. Dans le domaine des sustentations sans contact, il faut mentionner également la sustentation magnétique qui paraît envisageable pour le futur, même si les recherches effectuées en Allemagne et au Japon concernent surtout, pour l'instant, les grandes vitesses. Les avantages attendus de la sustentation magnétique en milieu urbain sont les suivantes : réduction du bruit et des vibrations, diminution de l'entretien des voies, réduction du gabarit en hauteur des véhicules. Actuellement les deux seuls systèmes urbains à sustentation magnétique sont le Maglev et l'aéroport de Birmingham, sans grande prétention, et le M-Bahn allemand, d'une technologie très spéciale que nous évoquerons plus loin. Nous évoquerons aussi ultérieurement les projets suburbains.

### 4.3. Motorisation

Les progrès en électronique de puissance ont permis d'améliorer la traction par moteur à courant continu, que ce soit pour les métros, les tramways ou les systèmes automatiques guidés, car les hacheurs améliorent aussi bien le confort que l'efficacité énergétique. Il est maintenant possible d'envisager des motorisations sans collecteur, chaque pays ayant des préférences plus ou moins marquées à cet égard. Que ce soit pour l'un ou l'autre type de motorisation, de nouvelles améliorations des schémas électriques peuvent être apportées par l'utilisation d'un nouveau composant d'électronique de puissance : le thyristor GTO ou thyristor à extinction commandée par la gachette. L'INRETS-LTN effectue des travaux dans ce domaine, du point de vue de l'utilisation de ces nouveaux composants.

Une autre innovation consiste à remettre au goût du jour le moteur linéaire dans le but de réduire bruit et usures, d'abaisser le gabarit en hauteur des véhicules, et de garantir des accélérations et décélérations indépendantes des conditions d'adhérence. Le rendement moins élevé que pour les moteurs rotatifs n'est pas un inconvénient gênant si l'on considère que :

- la différence de rendement est en grande partie compensée par l'allègement du véhicule, la suppression de la transmission mécanique et le choix du roulement fer plus économe que le roulement pneu ;
- même s'il subsiste un petit écart de consommation d'énergie, ce n'est pas un facteur déterminant pour un transport collectif performant et à traction électrique ;
- le moteur linéaire à induit en U (fabrication CedDUC sous licence (GUIMBAL), sur lequel l'INRETS-LTN a effectué un certain nombre de travaux depuis une quinzaine d'années, a de meilleures caractéristiques électriques (rendement et facteur de puissance) que le moteur linéaire plat traditionnel.

Outre le système UTDC, le moteur linéaire plat est utilisé sur le prototype japonais LM1, et sur des systèmes à voie active électrique (voir ci-après). Le moteur linéaire à induit en U est quant à lui envisagé pour deux projets, l'un urbain, l'autre suburbain (voir ci-après).

### 4.4. Caisses de véhicules

Les progrès dans le domaine des matériaux, notamment des matériaux composites, pourront être de nature à procurer des allègements plus importants que ceux qui ont déjà été obtenus avec des alliages légers.

### 4.5. Infrastructures

Le génie civil représentant une grande partie du coût des projets, des améliorations sont également souhaitables dans ce domaine, notamment en matière de voie aérienne légère. Toutefois en France, contrairement à l'Amérique, l'idée de faire passer un système en aérien risque d'être souvent mal acceptée, du moins pour les centres ville ; comme l'implantation au niveau du sol n'est pas toujours possible — et nécessite des carrefours dénivelés pour le site propre intégral —, le passage en souterrain doit souvent être envisagé, au moins sur certains tronçons, en tranchée couverte ou en tunnel profond. Ce dernier cas représente jusqu'à présent la solution la plus coûteuse, mais des améliorations peuvent être attendues en matière de tunneliers. Par ailleurs la réduction du gabarit des véhicules, tant en hauteur qu'en largeur, pourra être un facteur d'économie sur le coût des tunnels plus ou moins important selon la méthode de réalisation. Ceci étant dit, il ne faut pas non plus sous-estimer l'impact de certaines technologies qui pourraient faciliter le passage en aérien, au moins dans certains cas particuliers, soit du fait de l'extrême légèreté des véhicules (par exemple le SK pour certaines liaisons particulières) soit du fait d'un niveau de bruit très faible.

## 5. Autres systèmes

Jusqu'à présent, à l'inverse des systèmes plus classiques métros ou tramways, les systèmes automatiques guidés se singularisaient par un très grand nombre de concepts imaginés et par un très petit nombre de réalisations concrètes. Maintenant le nombre de réalisations commence à devenir significatif... et le nombre de concepts techniques reste toujours important, bien que certaines filières aient été abandonnées.

Depuis l'abandon des PRT, le concept le plus répandu est celui du mini-métro automatique, avec plusieurs variantes selon le type de sustentation, de motorisation ou d'automatismes. Un autre concept a donné lieu à plusieurs projets, celui de voie active qui consiste à placer la motorisation au sol afin de rendre les véhicules passifs et donc a priori plus légers, et afin de se dispenser de transmissions d'informations entre la voie et le véhicule pour commander la vitesse. Ce concept a lui aussi plusieurs variantes selon la technologie utilisée.

### 5.1. La voie active électrique

Selon le principe le plus courant, des inducteurs de moteurs linéaires se trouvent répartis sur toute la longueur de la voie et

Fig.16. La sustentation magnétique du M-Bahn de Berlin utilise des aimants permanents servant en même temps d'organe de réaction pour les moteurs linéaires (photo AEG)

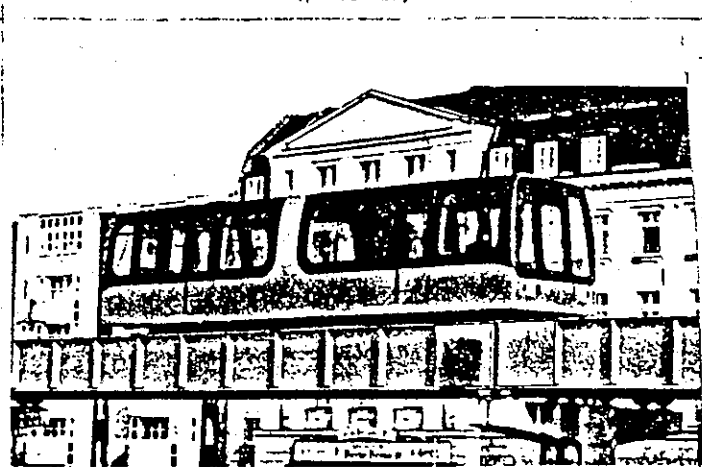




Fig.17. De la solution assez classique de la traction par câble utilisée en transport urbain sur roues, il ne subsiste que le Cablecar de San Francisco, récemment rénové.

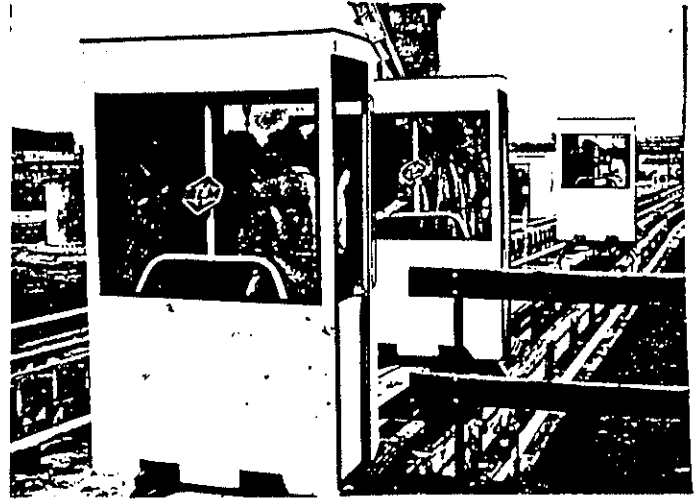


Fig.19. Les petites cabines Delta V, conçues par BLU, n'ont pas actuellement dépassé le stade du prototype (photo BLU)

le véhicule ne porte que l'organe de réaction, constitué en général d'un sandwich acier-cuivre. Ce principe s'est concrétisé aux États-Unis avec le moteur linéaire plat : système *Wedway* au *Disneyworld* d'Orlando et à l'aéroport de Houston, et en France avec le moteur linéaire à induit en U : système *Télébus*. Si l'on met à part le prototype de la Foire de Saint-Étienne qui a fonctionné en 1976, le *Télébus* n'a connu jusqu'à ce jour aucune application urbaine, mais actuellement des industriels s'intéressent à un système dérivé de ce principe, avec le même type de motorisation, mais une sustentation originale utilisant des coussins d'air : le système *Transville*.

Une autre possibilité pour réaliser une voie activée électrique consiste à bobiner toute la voie avec des enroulements de cuivre ou d'aluminium. Le système allemand *M-Bahn* fonctionne selon ce principe, en association avec la sustentation magnétique qui utilise des aimants permanents servant en même temps d'organe de réaction pour la motorisation linéaire. Il convient quand même de signaler que, bien qu'à sustentation magnétique, ce système — mis en service sur un premier tronçon à Berlin en 1969, en construction à Las Vegas et envisagé pour l'aéroport de Francfort — comprend un grand nombre de galets pour régler l'entrefer et reprendre une partie des efforts verticaux, pour assurer le guidage latéral et pour franchir les aiguillages.

expérimentation

Fig.18. Le système à câble *Poma 2000* a connu une longue période d'expérimentation et de mise au point avant de recevoir une application commerciale à Laon (photo SEMTUL)

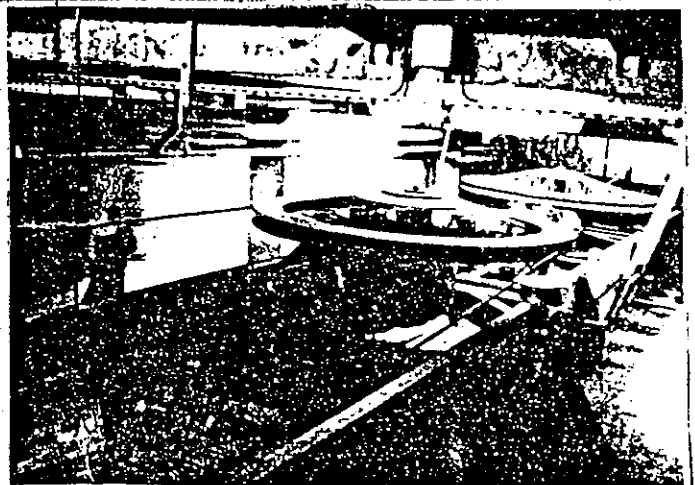
## 5.2. La voie active mécanique

La solution la plus courante est la traction par câble qui avait pratiquement disparu pour l'entraînement de véhicules urbains sur roues depuis l'abandon des *cables cars*, ou tramways à câble (seul subsiste le fameux *cable car* de San Francisco) ; elle a connu un petit regain d'intérêt pour les systèmes automatiques aux ambitions modérées (la vitesse pouvant difficilement dépasser 40 km/h), car le câble, outre sa fonction de traction, permet de participer à l'espacement des véhicules.

Le *Poma 2000* a été mis en service début 1989 sur le site de Laon — 1,5 km, 3 stations, 3 véhicules — où il est implanté en grande partie en aérien ou au niveau du sol sur le site d'un ancien tramway à crémaillère. Cette solution, assez coûteuse par rapport au débit du site (800 p/h/sens au maximum), permet d'offrir à l'heure de pointe un intervalle de passage de 2,5 mn, au lieu des 20 mn de l'ancien tramway.

La traction par câble a permis de mettre au point deux systèmes dits « semi-continus » : succession de petites cabines à cadence élevée ne s'arrêtant pas totalement en station sauf cas particulier. Contrairement au *Delta V*, qui n'a pour l'instant pas dépassé le stade du prototype, le *SK* a connu des applications commerciales. Nous ne nous attarderons pas

Fig.20. Le système *SK*, de Soulé, est également un système de petites cabines à câble. Moteur et poulie d'entraînement de l'installation en service au parc des expositions de Villepinte (photo NATP)



Poma  
diapo



Fig.21. Le mini-métro automatique des Docklands, à Londres, utilise le roulement classique roue sur rail. Il conserve un agent par rame pour reprise manuelle en cas de panne

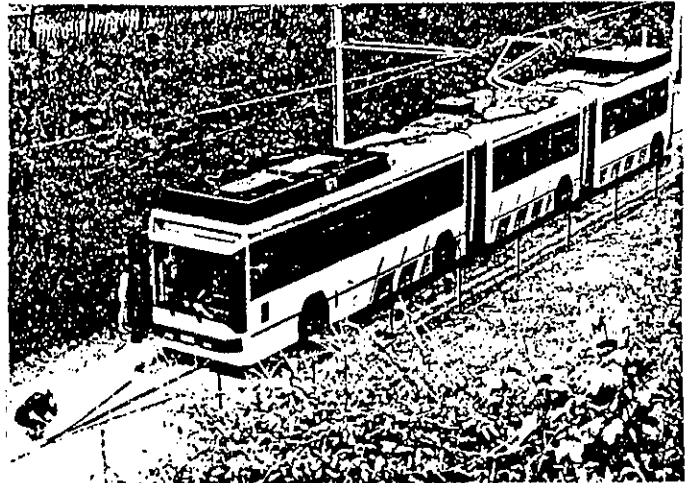


Fig.22. Le GLT belge, expérimenté entre Jemelle et Rochefort, est un véhicule bi-mode : tantôt tramway sur pneus dont une arrière dans le sol assure la guidance et le retour du courant de traction, tantôt autobus diesel sur les parcours non équipés (photo W. Hendrickx)

sur ce système original, constituant à certains égards une première mondiale sur son créneau très spécifique, puisqu'un article lui est consacré dans ce numéro.

Les systèmes du type Poma 2 000 ou SK ont souvent été classés dans la catégorie des systèmes dits hectométriques c'est-à-dire des systèmes mieux adaptés aux dessertes courtes pouvant, le cas échéant, aller jusqu'à 2 ou 3 km, qu'aux dessertes plus longues.

### 5.3. La voie active pneumatique

Afin de montrer que des idées inhabituelles peuvent être utilisées, nous évoquerons brièvement le concept de l'Aeromovel brésilien, selon lequel les véhicules sont propulsés à l'aide d'une « quille » circulant dans le caisson de la voie en béton, alimentée en air comprimé par des souffleries placées au sol. Là encore il s'agit de la réutilisation d'un principe ancien utilisé il y a un siècle localement sur la ligne de Saint-Germain-en-Laye. Rien ne prédisposait un tel système à être digne d'intérêt, sauf qu'une ligne commerciale en boucle, de 3,2 km avec 6 stations, a été commandée pour Jakarta et ~~ouverte~~ ouverte au public ~~en~~ cette année.

### 5.4. Systèmes divers

Nous ne nous étendrons pas sur les divers monorails à véhicules chavachants ou suspendus qui ont connu un regain d'intérêt, notamment au Japon, ni sur les systèmes à câbles porteurs dérivés des transports de montagne ni sur le système H-Bahn de l'université de Dortmund, qui comporte des véhicules suspendus à un petit bogie circulant dans une poutre caisson aéroéolienne.

Parmi les systèmes automatiques à roulement fer, nous citerons encore le prototype du TAU belge à roues désolidarisées commandées individuellement par des moteurs-roues à grande vitesse avec réducteur incorporé, et le mini-métro automatique des Docklands à Londres, qui a la particularité de conserver un agent par rame, uniquement pour des reprises en manuel en cas de panne, ce qui simplifie donc les automatismes.

### 5.5. Systèmes suburbains

De même que, pour certains tronçons, les réseaux urbains peuvent être complétés par des transports hectométriques à

Tableau 2. Systèmes automatiques français illustrant les trois grands créneaux d'application (Note : certaines valeurs, par exemple les ~~résumés~~ résumés, ne sont données qu'à titre indicatif ; Starlim est encore à l'état de projet, alors que le VAL et le SK ont connu plusieurs réalisations commerciales. Les caractéristiques peuvent varier d'un site à l'autre)

Type de desserte :	suburbaine	urbaine	hectométrique
Nom du système :	Starlim (projet franco-allemand)	VAL 206, type Lille	SK, type Villepinte
<b>Caractéristiques générales</b>			
Vitesse maximale (km/h)	150 (en pointe 200)	80	20 à 25
Puissance (kW)	700 (en pointe 1 050)	650	60 (une boucle)
Accélération (m/s <sup>2</sup> )	1,3 jusqu'à 10 m/s (en pointe jusqu'à 15 m/s)	1,3	1
Rampe maximale (%)	10	10	5 à 10
Rayon de courbure minimal (m)	30	40	30
Rayon de courbure vertical minimal (m)	500	1 000	120
Intervalle minimal (s)	90	60	18
<b>Véhicule</b>			
Longueur (m)	30	26	2,75
Hauteur (m)	2,90	3,25	2,51
Largeur (m)	2,60	2,06	1,40
Capacité nominale par véhicule (voy.)	164	160	12
- dont assis	68	44	6
- dont debout (à 4 voy./m <sup>2</sup> )	96	116	6

vitesses modérées, il peut exister un besoin de liaisons plus rapides, avec une vitesse maximale de l'ordre de 150 km/h : liaisons pôle à pôle, centre ville-aéroport, rocades suburbaines, etc. C'est dans ce contexte que sont étudiés deux systèmes à sustentation magnétique dans le but de faciliter une insertion en milieu urbanisé en voie aérienne (ce qui est le cas au minimum aux extrémités de la ligne) : le HSST au Japon et plus récemment Starlim, dont l'étude de faisabilité a été faite en coopération franco-allemande. Dans ce dernier cas les électro-aimants et leur commande sont dérivés de ceux du Transrapid allemand conçu pour les grandes vitesses, les automatismes sont dérivés du VAL et la propulsion est le moteur linéaire à induit en U déjà évoqué.

## 5.6. Systèmes classiques

L'amélioration technologique des composants peut bénéficier également aux systèmes classiques métros ou tramway. D'ailleurs la frontière entre les modes pourra progressivement s'estomper dans la mesure où certains des systèmes classiques pourront être de plus en plus automatisés (le projet Maggaly de la ligne D du métro de Lyon est très novateur) et où certains systèmes automatiques guidés choisissent le roulement fer. Par ailleurs on pourrait envisager des tramways légers sur pneumatiques ou au contraire des autobus ou trolleybus guidés. Un tel concept "mixte" a déjà été étudié avec le GLT belge.

## Conclusions et perspectives

À la suite de la décantation de ces vingt dernières années, la recherche de modes nouveaux urbains a débouché sur des systèmes automatiques guidés qui commencent maintenant à faire leurs preuves en milieu urbain ; certains sont prêts à être reproduits en plusieurs exemplaires. Le VAL en est sans doute le meilleur exemple, mais nous avons vu que les mêmes préoccupations existent dans d'autres pays du monde, et que de nombreuses solutions technologiques existent, des systèmes hectométriques aux systèmes suburbains en passant par le concept dominant de mini-métro automatique. Il y a encore des progrès à faire pour qu'au cours des prochaines années les systèmes automatiques deviennent très bien adaptés aux villes moyennes, et non plus seulement aux grandes villes ou à des sites particuliers.

On pourrait certes considérer que ces systèmes sont concurrents de solutions traditionnelles tramway ou métro léger, un peu moins performantes mais nettement moins coûteuses lorsqu'elles passent au niveau du sol ; mais on peut aussi considérer que ces nouveaux systèmes élargissent la variété des systèmes de transport collectif proposés aux décideurs locaux. Il intervient en effet des raisons autres que

techniques dans le choix entre le site banal ou site protégé au sol et le site propre intégral, et la technologie retenue est au moins autant la conséquence d'un choix que la cause de ce choix. Le véritable enjeu est en fait de savoir quelle sera la place respective des transports guidés urbains, quels qu'ils soient, et de l'automobile, dont l'usage est actuellement très important en ville. Le fait de disposer d'une gamme de systèmes différents les uns des autres, pour s'adapter aux divers contextes géographiques, sociaux ou politiques des villes, pourrait être un atout pour les transports collectifs. De son côté l'automobile explore de nouvelles solutions pour accroître encore son attractivité ; parmi celles-ci on peut noter le site propre intégral (on voit même poindre des projets futuristes d'autoroutes urbaines souterraines...) et une automatisation plus ou moins poussée à divers niveaux, notamment dans le cadre des projets de recherche européens, qui vont jusqu'à envisager un espacement automatique des véhicules pour le long terme. Les transports collectifs ne sont-ils pas contraints d'exploiter la petite avance qu'ils ont prise en matière de site propre intégral et d'automatismes intégral s'ils veulent faire de nouvelles percées en matière d'attractivité ?

## Références bibliographiques

Le bilan économique de l'automatisation intégrale d'un système de transport guidé, par Yves David, RTS n° 13, mars 1987 (spécial transports guidés urbains).

Transports guidés au sol - Solutions nouvelles - Application au transport de voyageurs, par Claude Soulas, Techniques de l'Ingénieur, A 999.

Les principes de contrôle des trains dans les systèmes automatiques guidés, par Philippe Prévôt, Rapport INRETS/CRESTA, 1985.

International Transit Compendium, vol IV, ID Lea Transportation Research Corporation/Studiengesellschaft Nahverkehr.