



Revue trimestrielle de l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité éditée par l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité 2, av. du Général Malleret-Joinville 94114 ARQUEIL Cedex.  
Tél. (1) 45 81 12 12

*Directeur de la publication*  
Georges DOBIAS  
*Rédacteur en chef*  
André IMBERT

*Comité de lecture*  
Bernard GERARDIN (président)  
Sylvie ABOURS, Maurice ARON,  
Jean-André BLOCH, Yvon CHICH,  
Maryvonne DEJEAMMES, Jean DELSEY,  
Pierre DUFLOT, Francis FERRANDEZ,  
Hélène FONTAINE, Marc HEDDEBAUT,  
André IMBERT, Brigitte LEJEUNE,  
Roger MARCHE, Maurice PRUVOST,  
Maurice ROSEAU, Claude SOULAS  
Christian TETARD

*Abonnements*  
Janine DUBOURG  
2, av. du Général Malleret-Joinville,  
94114 ARQUEIL Cedex.  
Tél. (1) 45 81 12 12 poste 1225.  
Les 4 numéros  
France: 200 francs TTC  
Etranger: 250 francs

*Photographies*  
Alain ROUSSELLE (INRETS)  
*Impression*  
Imprimerie CHIRAT  
744, rue Sainte-Colombe  
42540 SAINT-JUST-LA-PENDUE

Conception LINEALE  
Achévé d'imprimer en mai 1987  
Dépôt légal: mai 1987 N° 3245  
L'INRETS n'est pas engagé par les opinions émises dans les articles publiés par «Recherche-Transports-Sécurité». Les articles et les informations contenues dans ce numéro sont librement reproducibles sous réserve de mentionner l'origine: «Recherche-Transports-Sécurité».

N° de commission paritaire: 1220 ADEP

## Sommaire

Editorial de Louis GUIEYSSE 3

### RÉSUMÉS

Le bilan de l'automatisation intégrale d'un système de transport guidé  
Yves DAVID 11

Les transports urbains guidés de surface — Situation actuelle et perspectives  
Francis KUHN 19

Les transports à courte distance: comparaisons, progrès récents  
Alain BIEBER  
Jean-Paul COINDET 29

Sur la réglementation de la sécurité des transports nouveaux par objectifs quantifiés  
Jean-François DHALLUIN  
Henri-Bertrand THIBAULT 33

MAGGALY: l'automatisation intégrale d'une ligne de métro sur un réseau existant  
Jacques PERNOT  
Christian TEILLON 39

Etude économétrique de la fréquentation du métro de Lille  
Serge DORMARD  
Odile HEDDEBAUT 45

Système suburbain à moteur linéaire: coopération franco-allemande  
Jean-Louis MAUPU  
Claude SOULAS 51

Le système ARAMIS et l'expérimentation en cours  
Maurice SALOIN 56

Performances d'un canal de transmission numérique sol-véhicule utilisant la propagation libre de micro-ondes en tunnel  
Marc HEDDEBAUT 59

Métro BOA à essieux orientables et intercirculation  
Jean-Pierre RAGUENEAU 67

Cinémomètre à effet Doppler  
Pascal DELOOF 71

# AVANT-PROPOS

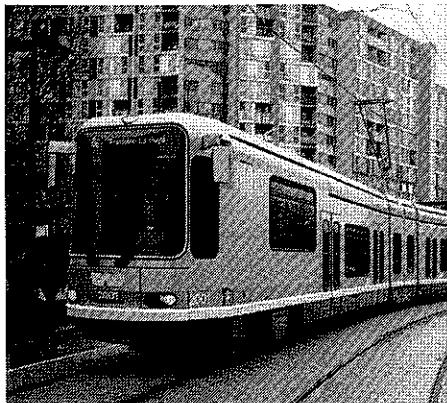
Ce numéro thématique de RTS est consacré aux Transports guidés en France et dans le monde, à la suite du Colloque organisé par l'AFCET, les 3, 4 et 5 février 1987, pour présenter les travaux effectués dans le cadre du programme de recherche et de développement technologique des transports terrestres.

Ce numéro marque en fait une inflexion dans la gestion de la revue qui s'ouvre, à cette occasion, mais de manière définitive, à des auteurs qui n'appartiennent pas à l'Institut national de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

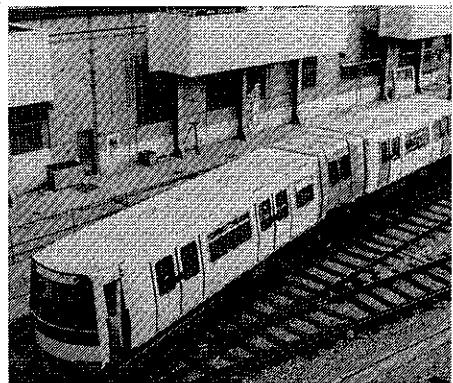
Je me réjouis que ce soit M. Louis Guieysse, Directeur Général adjoint de la RATP, animateur du thème de recherche sur les transports guidés dans le cadre du PRDTTT, qui signe la préface de ce numéro spécial.

**Georges Dobias**  
*Directeur général de l'INRETS*

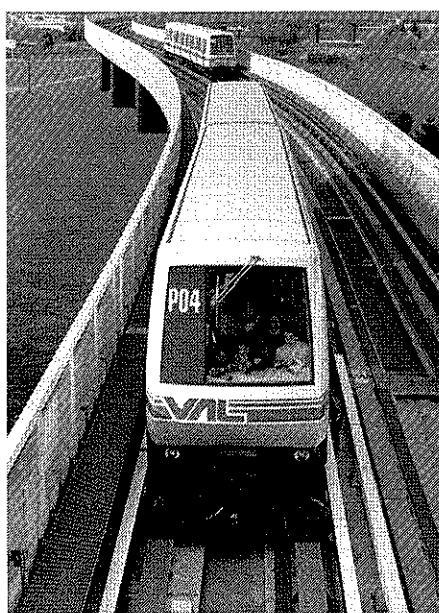
Le tramway de Grenoble



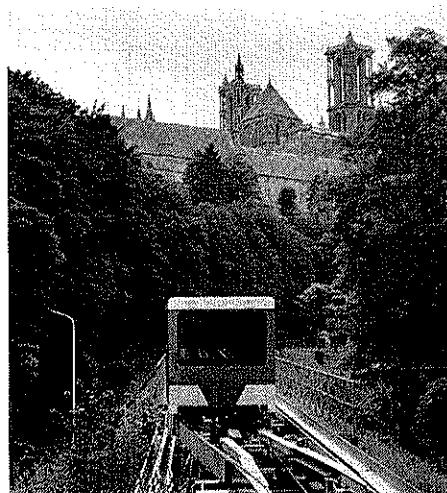
Metro BOA à essieux orientables de la RATP



Le VAL de Lille



Le système POMA 2 000 de Laon



Le système ARAMIS



Présentation de quelques réalisations françaises en matière de transports guidés urbains

## EDITORIAL

La parution de ce numéro spécial de RTS consacré aux Transports Guidés, quelques mois après le Colloque «Transports Guidés Systèmes, Automatismes et Communications» organisé par l'AFCET du 3 au 4 février 1987, s'inscrit dans un effort indispensable de confrontation de valorisation et de diffusion des travaux réalisés ou en cours dans ce domaine. En effet, près de quatre ans après le lancement, par le Ministre des Transports et le Ministre de la Recherche, du «programme de recherche et de développement technologique dans les transports terrestres» (PRDTTT), le moment est venu de dresser un premier bilan des recherches entreprises et d'en évaluer les retombées concrètes.

Une constatation domine ce bilan: la pénétration de plus en plus grande, dans le domaine des transports guidés, des applications les plus avancées de l'électronique, des techniques modernes de transmission et des automatismes. Les progrès de la technologie en la matière ont complètement renouvelé les possibilités offertes aux constructeurs et aux exploitants. Les recherches conduites dans le cadre du PRDTTT ont pour objectif de tirer le meilleur parti de ces potentialités nouvelles en tenant compte des contraintes inhérentes aux transports guidés: niveau très élevé de sécurité, nécessité de réaliser des gains importants de productivité, d'améliorer les conditions de travail des agents tout en améliorant sans cesse la qualité du service offert à l'usager. Des systèmes très ambitieux, d'un niveau de complexité et de performances qui n'aurait pu naguère être envisagé, sont maintenant en construction ou à l'étude: après SACEM et MAGGALY, après ARAMIS, c'est le projet ASTREE de la SNCF qui a vu le jour récemment.

Les techniques avancées de traitement et de transmission de l'information ne sont pas les seules concernées, le programme PRDTTT apporte aussi des innovations très importantes dans les domaines de l'électricité et de la mécanique: des concepts très classiques comme ceux du bogie et du moteur évoluent rapidement, aussi bien dans le cadre des recherches sur le métro de l'an 2000 (métro BOA) que dans celui de la définition des véhicules d'autres systèmes de transports guidés pour le futur (ARAMIS).

Différents aspects, de ces multiples progrès sont présentés dans les articles de ce numéro spécial, reflétant les points de vue complémentaires des usagers, des industriels, des exploitants et des chercheurs. Les solutions variées évoquées, répondant à la diversité des besoins existants en matière de transports guidés, ont été ou sont en cours d'expérimentation. Elles élargissent la palette des produits offerts par les entreprises françaises sur les marchés à l'exportation tout en permettant à la technique française de rester au tout premier rang au plan mondial dans le domaine des transports guidés.

L'un des principaux mérites du PRDTTT a été de permettre un échange permanent de tous les responsables impliqués dans ces différents projets; il en résulte une cohérence d'ensemble qui n'était pas évidente a priori. Je tiens à témoigner de l'excellent climat de coopération dans lequel se sont déroulés ces travaux: les industriels, les chercheurs des laboratoires publics et privés, les exploitants et les représentants des administrations ont pu travailler main dans la main et s'enrichir mutuellement. Cela a largement contribué au développement de synergies entre les différents partenaires, favorisant ainsi des échanges fructueux d'expériences et une accélération du rythme de la diffusion et de l'application des recherches de base au niveau des expérimentations en vraie grandeur tout en évitant une dispersion des moyens. On peut citer à titre d'exemple les nombreuses retombées des recherches conduites autour du projet SACEM, non seulement directement pour l'amélioration du service rendu sur la ligne A du RER, mais également pour les projets ARAMIS et MAGGALY (ligne D du métro de Lyon). Le bilan des travaux apparaît donc d'ores et déjà très positif. Mais rien n'est définitivement acquis dans ce secteur constamment confronté à la concurrence internationale, aux mutations technologiques et à l'évolution des marchés. Il ne faut pas s'arrêter au milieu du gué. C'est pourquoi, je souhaite vivement que la dynamique ainsi créée s'amplifie afin que les défis auxquels nous sommes quotidiennement confrontés puissent être relevés avec succès.

**Louis Guièyse**  
Directeur Général adjoint de la RATP

# Résumés — Summaries

## **Le bilan économique de l'automatisation intégrale d'un système de transport guidé**

**Yves DAVID**

L'objet de l'article est de procéder à une comparaison des coûts et des bénéfices liés à l'adaptation de la conduite automatique intégrale dans les transports urbains guidés.

Après avoir passé en revue les exemples de bilans analogues ayant fait l'objet de publications, l'auteur procède, sur un cas concret, à une analyse détaillée des différents postes d'un tel bilan.

Il montre qu'actuellement ce bilan est au voisinage de l'équilibre, au moins pour des lignes caractérisées par une fréquence élevée exigeant un parc important de trains, mais qu'il est très sensible à la taille de ce parc.

## **Cost-benefit analysis of fully unmanned driving in guided transportation systems**

*The aim of the paper is to evaluate the economical interest of full-automation in urban transportation systems.*

*After a survey of different publications on this subject, the author tries to compare, on a specific case, the respective costs of two modes of operation of a metro line, one with one driver, the other without driver, taking into account on one side the extra investments which are necessary to operate an unmanned system, on the other side the gains on salaries resulting from the reductions of staff.*

*It appears that, in the case of a line with short headways and an important fleet of trains, the balance between these two modes of operation is near the equilibrium, but that this balance is relatively sensitive to the size of this fleet.*

*This balance should become more and more positive in the future, due to the reduction of electronic components cost, and also due to the fact that unmanned operation allows more efficient lines configurations.*

## **Les transports urbains guidés de surface — Situation actuelle et perspectives**

**Francis KUHN**

On assiste actuellement à un regain d'intérêt pour les systèmes de transports guidés de surface qualifiés de «léger» ou d'«intermédiaire» depuis une quinzaine d'années.

Le renouveau de ces systèmes se traduit par des extensions ou la création de lignes nouvelles, par le développement de matériel roulant plus confortable et plus performant et par une amélioration de leur condition de circulation. L'objet du présent article est de résumer une étude faite à l'INRETS-CRESTA sur les systèmes existants dans le Monde et leurs perspectives de développement.

## **Grade Urban Guided Transportation — Present situation, trends and prospects**

*Light Rail Transit revival began approximately two decades ago. This revival appears through the extensions or the construction of new lines, the development of rolling stock becoming more comfortable and more efficient, and through the traffic stream improvement of these systems.*

*After a short description of the market available to these systems we examine the rights of way evolution: the LRT guideway can be completely grade separated or segregated horizontally from other traffic, it can be within a mixed traffic stream, it is the only guideway that is so versatile. Then we study the performances linked to these rights of way; we comment next the prospects of developments of guideway and rolling stock and we briefly treat of the aspects associated with operation and safety.*

*The overview of existing networks assessment shows that light rail system is particularly well adapted to the needs of range of towns and cities situated between 200 000 & 6 to 700 000 inhabitants in which the construction of metros could be hardly envisaged due to required investments.*

## **Les transports à courte distance: comparaisons et progrès récents**

Alain BIEBER

Jean-Paul COINDET

Cet article résume les réflexions d'un groupe de travail animé par l'INRETS sur le thème des transports à courte distance (200 à 2 000 mètres).

Une analyse fonctionnelle des trois «familles» de systèmes présentes sur ce créneau (trottoirs roulants accélérés, navettes doubles du type «funiculaire plat» et transports semi-continus) est effectuée pour montrer les différences et les complémentarités en termes de temps total de transport (temps d'attente moyen plus temps de transport station à station) et de performances de capacité.

Des comparaisons qualitatives concernant les coûts et les facultés d'insertion de ces systèmes ont été effectuées sur la base des données technologiques qui ont été accessibles au groupe de travail.

Enfin, les opportunités de développement de tels systèmes ont été brièvement situées, en relation avec l'évolution du contexte économique et urbanistique.

### **Short distance transportation systems: performances and recent progress**

*The paper summarizes the work accomplished in order to compare recently developed short distance systems.*

*Three main points are presented:*

- a technological typology for such systems,
- some performance comparisons
- a brief discussion of development and market opportunities.

*In the 200 to 2 000 meters three families of systems seems to be presently competing for development:*

- high speed moving sidewalks: with an entry and exit speed of about 3 km/hour their main problem is the design of an acceleration and deceleration system in order to reach a maximum speed of 12 km/hour;
- horizontal funiculars (two-vehicles "shuttle-like" systems) often cable propelled with a turnout at the middle point in order to take advantage of the single track ability of such systems;
- semi-continuous systems, also propelled by cable with vehicles shortly spaced (around 20 seconds), slowly moving through stations (at about 0,3 meter per second).

Leading systems of such families are, in France, respectively the TRAX, the NAHSAT and the SK systems.

Performance comparisons have been theoretically computed for:

- total travel time (i.e. average waiting time plus station to station cruising time).
- capacity (i.e. maximum number of people able to use the system in good conventional conditions of comfort).

The main results of the analysis show:

— the high complementarity of systems in the distance range. High speed moving sidewalks are faster on short distances (150-250 meters). Horizontal funiculars are at their best for intermediate distances. Semi-continuous systems are particularly fitted to medium and large distances;

— the very different capacity characteristics in relation with the size of vehicles for systems such as the horizontal funicular and the semi-continuous systems.

As for the development of market opportunities, it is positively rated in the long run due to the following facts:

- polarization of activities in a modern "auto-oriented" landscape
- development of large leisure centers
- inexpensive elevated tracks
- deregulation of urban transport, fostering local projects
- cost-efficiency prospects of such systems.

## **Sécurité des transports nouveaux par objectifs quantifiés**

Henri-Bertrand THIBAULT

Jean-François DHALLUIN

Considérant les évolutions actuelles des transports urbains automatisés vers une flexibilité accrue des automatismes et vers la sophistication des équipements, cet article tente de présenter d'une part le concept de sécurité probabiliste applicable aux systèmes complexes et d'autre part, du point de vue de l'autorité administrative, l'actualisation d'une réglementation de sécurité par objectifs quantifiés.

*Outside the present evolutions of urban transport automated towards more flexibility of the automatisms and the sophistication of the equipments, this paper first presents the probabilist safety concept applied to complex systems and then the actualization of a safety rule based on quantified objectives.*

*We call again the different principles of rules applied to the systems and we show the homogeneity existing between quantified objectives and a probabilist safety evaluation. Then we present an analogy with the civil aviation and the nuclear power plant assessment. Eventually we discuss about the limitations of the rule and the safety studies.*

### ***MAGGALY: l'automatisation intégrale d'une ligne de métro sur un réseau existant***

**Christian TEILLON**  
**Jacques PERNOT**

Dans le cadre du développement croissant des réseaux pour l'automatisation intégrale, celle de la nouvelle ligne D du Métro de Lyon constitue une étape vers l'automatisation de lignes existantes.

Les décisions qui ont été prises montrent l'intérêt que lui portent, non seulement les collectivités locales, mais aussi l'Etat et la RATP.

Pour le Maître d'Ouvrage, l'amélioration attendue se situe sur trois plans: l'enjeu économique, la qualité de l'exploitation et l'image du réseau. A ces trois éléments, il faut ajouter pour l'exploitant une évolution certaine des tâches effectuées par le personnel.

L'automatisation de la ligne D pose de nouveaux problèmes vis-à-vis de la sécurité, notamment pour les échanges en station. Une approche pragmatique en est faite, par analyse de scénarios, et les dispositifs envisagés sont issus de matériels déjà utilisés pour d'autres applications.

### ***MAGGALY system: the full automatization of a subway line on an existing network***

*With the MAGGALY system, line D of the Lyons subway will be fully automated. Decision was taken in december 1985, three years after the beginning of construction, and operation is forecasted for the end of year 1990.*

*Full automation was decided for the following reasons:*

- increased productivity, by reducing line D operating cost by 20% or 10 millions francs/year,*
- better service flexibility, by scheduling the train services without any personnel rostering constraints, allowing better headway off peak and a better match of supply and demand during peak and full hours,*
- promotion of higher level jobs in the operation, favoring the evolution of personnel motivation,*
- participation of Lyons subway in the development of new technologies.*

*Additional investment reaches 200 Millions francs, and additional delay about one year.*

*The emphasis on better productivity coincides with a new type of contract relations between the public transport authority and the operator, on the basis of a forfeited operating cost for PTA, and interest on farebox receipts for the operator.*

*Full automation of line D was, however, heavily constrained by the existing infrastructures, the necessary standardisation of equipments with those of lines A and B, a similar perception for the users. Therefore safety for passenger movements in station or during the on-off boarding of trains could not be resolved by placing platform screens and doors as in Kobe, Osaka or Lille. Other devices are being used such as:*

- sensitive door edges on the trains,*
- penetration detectors over the track in the station, by using either infrared detectors or TV image analysis,*
- penetration detectors at each opening of the tunnel.*

*All these systems have been developed for other applications. The issue is mostly in their adaptation to the subway uses.*

*In 1990 when line D operates, it will be the first full size and large gauge subway to be fully automated. The techniques used should be adaptable to the automation of existing subways, opening a new range for increased productivity and quality of service throughout the world.*

## **Une étude économétrique de la fréquentation du métro de Lille**

**Serge DORMARD**

**Odile HEDDEBAUT**

En 1987, quatre ans après la mise en service payant du métro de Lille, une étude tente de dégager les principaux facteurs explicatifs de l'évolution mensuelle du trafic du VAL. Différents tests des relations économétriques entre les nombres mensuels de compostages et de voyages et différentes variables telles que le temps, l'offre, le tarif, le confort ont été effectués.

Ces modèles économétriques ont permis de démontrer l'absence de croissance temporelle du flux de voyageurs du VAL et le rôle mineur que semble jouer la tarification dans cette évolution de trafic.

Après avoir montré la possibilité d'utiliser ces modèles comme instrument de prévision du trafic, cette étude met également en évidence l'effet positif sur le nombre d'usagers d'une amélioration du confort des voyageurs due à un meilleur ajustement de l'offre à la demande.

### ***An econometric study of the Lille metro passenger use***

*The study of different new town projects throughout the world shows how important it is to associate problems of urban growth with those relating to the movement of individuals: whether by public or private means of transport.*

*Therefore the new town development corporation (EPALE) thought of a public transport system which would run on a new independant line between the new town and Lille station. This line will be the basis of the future public transportation network.*

*One of the key characteristics of the new system should be its quality of service. This should be so attractive that it would draw passengers away from their private cars and so avoid increased traffic problems in the centre of Lille that would otherwise be provoked by additional private vehicles coming from the new town.*

*In 1987, some four years after the VAL had started passenger service, further information on the number of passengers using the metro in Lille was gathered. We often set out to determine the variables which would explain the increased use of public transport.*

*We tested several econometric patterns and we concluded that the increase in demand for public transport was not due to the time and cost factors but rather to a change in the public transport supply and to the improved quality of service available to users.*

## **Système suburbain à moteur linéaire — Coopération franco-allemande**

**Jean-Louis MAUPU**

**Claude SOULAS**

Une coopération franco-allemande engagée depuis plusieurs années au niveau de composants comme le moteur linéaire asynchrone à induit en U et les électroaimants se poursuit maintenant avec l'étude de faisabilité d'un système suburbain. L'objectif consiste à réunir plusieurs caractéristiques (vitesse de 150 km/h, rayon de courbure aussi proche que possible de 30 m, période de l'ordre de la minute, etc.) que l'on ne trouve généralement pas rassemblées dans un même système. Dans la première phase en cours deux versions sont étudiées en parallèles: la sustentation magnétique, et la sustentation par roues avec orientation magnétique des essieux.

### ***Suburban system with linear motor drive — French-german cooperation***

*A French-German cooperation began a few years ago. Economical studies such as comparisons of high-speed transportation systems and technical studies of components such as linear motor and electromagnets have already been achieved. The purpose of a new project consists now in the realization of a suburban system propelled by a linear induction motor with a U-shaped armature. Only the first phase has been engaged; it concerns the feasability study. On the french side Matra Transport is the main contractor, this company has signed an agreement with Thyssen-Henschel. INRETS and RATP also participate in this programm.*

*The system must be fully automated, with a high frequency, if possible a minimum headway of 1 min should be reached. It must be designed for suburban applications with a maximum speed of 150 km/h, but with possibilities of insertion in urban areas and airports where a small curve radius (for example 30 m) can be required.*

During this first phase, two versions have to be studied: magnetic levitation with magnetic guidance as well as wheel sustentation with magnetic guidance. The principle of magnetic levitation can be compared with that of the Transrapid conceived in Germany for high speeds but the propulsion is different (short stator instead of long stator).

For the wheel sustentation with magnetic guidance INRETS has proposed a new principle: each vehicle has two axles which are steered by electromagnets using the U-shaped armature of the linear motor as a reference. Thus it is not necessary to conceive the electromagnets in order to produce the whole lateral guidance force but only the steering force. The iron wheels are flat and without flanges but another type of thrusts is foreseen to protect the inductor of the linear motor. A test of this new principle will be carried out on the test wheel in Grenoble (13 meters in diameter) by means of a reduced scale axle. Both of the versions described above use the same type of linear motor with U-shaped armature, which has proved to have better electrical characteristics than the flat motor, especially as regard to the power factor.

The originality of the suburban material studied consists in trying to gather various characteristics which are usually not combined in the same system.

### **Le système ARAMIS et l'expérimentation en cours**

**Maurice SALOIN**

ARAMIS est un système automatique guidé de petit gabarit constitué de doublets (deux véhicules de dix places assises) couplés électroniquement en rame. Les essais du premier doublet ont commencé en juin 1986 sur le Centre d'Expérimentation Technique du boulevard Victor à Paris. Les essais complets de cinq doublets avec tests d'endurance commenceront au second semestre 1987.

#### **The ARAMIS system and its actual experimentation**

ARAMIS is an automated people mover, it takes up less space than a conventional light rail, is more flexible, and expected to be more attractive to passengers.

Each rubber-tyred, guiderail steered, married pair carries 20 seated passengers.

Automatic coupling and splitting, no mechanical link between married pairs of multiple vehicle trains, on board switch wheels and passive guideway rails are the main features of ARAMIS system.

During peak periods, the system is able to carry more than 10 000 passengers/hour/direction by operating 63 m trains (7 married pair/train) at 45 second headway.

Tests on ARAMIS system started june 86 on Experimentation Center at Bd. Victor (Paris) with the first married pair.

Complete operating tests with five married pairs and reliability tests will start during the second semester 1987.

### **Performances d'un canal de transmission numérique sol-véhicules utilisant la propagation libre de micro-ondes en tunnel**

**Marc HEDDEBAUT**

La propagation libre d'ondes hyperfréquences en tunnel est un procédé attractif de transmission de données entre sol et véhicules. Cet article décrit les performances d'un tel dispositif utilisant un canal dans la bande des 10 GHz et expérimenté en tunnel routier ainsi qu'en tunnel métropolitain. Les taux d'erreurs bruts de la liaison ainsi que les longueurs des paquets d'erreurs sont calculés puis mesurés dans différentes configurations de l'équipement de réception. Quelques exemples de codage de l'information numérique sont également présentés qui permettent d'assurer la détection des erreurs de transmission.

#### **Performances of a data transmission link between ground and vehicles using natural propagation of microwaves in road and railways tunnels**

The problem of providing data communications between ground and vehicles in tunnels has received considerable attention, and it seems to be more and more important with the spreading out of fully automated, driverless, urban transportation systems.

Conventional data transmission devices use two-wire inductive loop transmission lines which permit reception of signals transmitted to and from the vehicle using low carrier frequencies (< 150 kHz). Anyhow, these loops are potentially vulnerable to maintenance operations on wayside equipment. On another hand, only low or medium rate communications can be achieved using this technology.

New needs in transmissions are pointing out. First of all, the important number of microprocessor devices to ensure automatic control of the train leads to an increase of data which have to be transmitted towards the ground to allow maintenance. Then, security of the passengers can be reinforced by transmitting television signals from inside the vehicles and also from the track in front of the train to the operating staff. Last, entertainment and advertising television programs can be transmitted towards the passengers.

Natural propagation of microwaves in tunnels seems to be rather attractive for transmitting telemetry and remote control commands between ground and vehicles in tunnels. This paper shows the performances of such a data communication obtained with a 10 GHz link in road and automated guideway transit system tunnels. Bit error rates and lengths of the errored messages are calculated and measured using several configurations of the receiving equipment. Attempts are also made to code the numerical informations to achieve a reliable communication.

### **Métro BOA à essieux orientables et intercirculation**

**Jean-Pierre RAGUENEAU**

Recherchant des solutions aux problèmes posés par la difficile inscription des bogies dans les courbes, la RATP a imaginé un système de guidage d'essieux simple permettant un allègement des voitures et une intercirculation « habitable » entre les voitures. Un train d'essais de trois voitures a permis de vérifier le bien fondé des concepts de base et d'en évaluer les avantages et les inconvénients.

Actuellement, la RATP se prépare à vérifier en endurance le comportement de cette technologie.

### **BOA metro, with steerable axles and intercirculation**

The utilization of present time metro vehicles equipped with bogies induces wearing of rails and wheels, especially in short radius curves. This wearing has been increasing during the last few years because of the characteristics of the modern monomotor bogies.

It is the main reason why RATP began to study a solution consisting of steerable axles instead of bogies and with independent wheels. It appears that such a new concept could also bring other advantages:

- the optimization of the axle load (the substructures of the Parisian underground metro allow an axle load of 15 tons)
- a reduction of the weight of the train (which induces also a reduction of the energy consumption)
- the possibility of a total intercirculation along the train (which induces also a slight increase of the train capacity).

With this new principle the orientation of each axle depends of the position of the coupling bar. For the front bogie and the rear bogie a special device is necessary, it consists of two small steering wheels.

RATP has built a three car train as a mock-up. After a 18 months' trial period test, it is clear that the main ideas are good. Now RATP foresees to put this train in operation in order to test the behaviour in line.

A first analysis of industrial solutions gives an important reduction of weight (about 20% of empty weight). Thus, despite of the suppression of the bogies it should not be necessary to shorten the length of the cars, which is normally 15 m.

**Cinémomètre à effet Doppler**

**Pascal DELOOF**

**Jean VINDEVOGHEL**

**Jacques BAUDET**

L'automatisation croissante dans le domaine des transports terrestres implique de connaître avec précision la vitesse et la localisation des véhicules; c'est dans ce but qu'est étudié un cinémomètre micro-onde embarqué fondé sur l'effet Doppler. La finalité de cette recherche est d'obtenir un capteur miniaturisé à l'état solide, et de faible coût, grâce aux techniques d'intégration sur Arsénure de Gallium, et par l'emploi d'antennes plaquées et de circuits hybrides. Un prototype a été élaboré pour une application routière et une deuxième version ferroviaire est envisagée.

**Doppler effect — Speed measurement device**

*The growing use of automatism in the domain of ground transports implies an accurate measurement of speed and location of vehicles. For this purpose, a Doppler effect based speed measurement device has been studied. The objective of this work is to obtain a cheaper solid state miniaturized device, through integration technics on Gallium Arsenide, and through the use of microstrip antennas and hybrid circuits. The printed circuit of antenna is also used to carry: the oscillator in a Microwave Integrated Circuit, and an hybrid duplexer made of a rat-race circuit, a power divider and a Schottky diode detector.*

*The MIC has been studied in several phasis: a first prototype has been made in hybrid technology with a CAD program; then a few devices were integrated. The last one has a thermal stabilization of frequency, and works correctly at 7,4 GHz.*

*Several microstrip antennas have been tried on sites: for road applications, the best would be a dissymmetrical lobe antenna called "antenne rideau", as the directional one is suitable for railway vehicles.*

*At the same time hardware and software have been developped to draw out the speed from Doppler signal. This treatment is obtained in a micro-computer which could be integrated on the antenna.*

# Le bilan économique de l'automatisation intégrale d'un système de transport guidé

Yves DAVID

Directeur du CRESTA  
Centre de Recherche  
et d'Evaluation des Systèmes  
de Transport Automatisés  
(INRETS)



De nombreux systèmes de transport à conduite automatique intégrale ont été mis en service au cours de ces quinze dernières années, et fonctionnent de façon satisfaisante.

Ces systèmes ont d'abord été construits pour la desserte de sites spécifiques: aéroports, parcs d'attractions, domaines universitaires, centres commerciaux.

Ils ont fait cependant une entrée remarquée dans les transports publics urbains au début des années 1980, avec la mise en service du VAL, et des systèmes japonais de Kobé et d'Osaka — encore que dans ce dernier la fonction d'«accompagnateur» n'ait toujours pas été supprimée.

Avec l'ouverture en 1986 des systèmes de Vancouver, Miami, et avec les nombreux systèmes en cours d'étude ou de construction tels que la ligne 1 bis de Lille, la ligne D de Lyon, les «VAL» de Toulouse, Strasbourg et Jacksonville, le métro de Detroit, le «TAU» de Liège, etc., on peut affirmer que l'automatisme intégral est entré dans les mœurs, et se présente maintenant comme une variante à prendre sérieusement en considération pour tout nouveau projet de ligne de transport urbain.

Les raisons en sont:

- d'une part que ce mode de conduite présente des avantages considérables tant sur le plan de la qualité de service que de la facilité d'exploitation d'un système de transport;
- d'autre part que les craintes exprimées il y a quelques années concernant l'attitude du public vis-à-vis des systèmes complètement automatiques et concernant les problèmes de sécurité que ces systèmes pourraient soulever se sont dissipées;
- enfin que le prix à payer pour ces avantages est considéré comme acceptable par les exploitants.

C'est ce dernier point que nous voudrions développer dans le présent article, en essayant d'établir le bilan financier de l'automatisme intégral.

## Difficultés d'établissement d'un tel bilan

L'établissement d'un bilan économique de l'automatisation intégrale est un exercice difficile, et c'est la raison pour laquelle il existe peu de publications sur ce sujet (réf. 2), (réf. 5), (réf. 7).

Une première approche peut consister à comparer les bilans d'exploitation de systèmes existants à différents niveaux d'automatisation. Malheureusement, ces bilans dépendent beaucoup des conditions générales d'exploitation de ces systèmes, qui sont rarement comparables d'une ville à l'autre, sur le plan notamment:

- de l'entretien des infrastructures,
- de la politique de fixation des effectifs de conduite,
- de la gestion des stations et en particulier des modalités de vente des titres de transport, et de contrôle de ces titres,
- de la qualité de service de la ligne, exprimée par exemple en termes de fréquence ou de durée journalière d'exploitation,
- de la politique de maintenance de l'entreprise, et du niveau de la sous-traitance dans ce domaine,
- du partage des tâches de maintien de la sécurité entre la Police et l'exploitant,
- de la ventilation des coûts et de la structure de la compétitivité des entreprises, qui souvent exploitent plus d'un mode de transport.

Il convient par conséquent d'être très prudent lorsque l'on interprète de tels bilans, ainsi que les ratios publiés par les réseaux sur l'emploi de leur main-d'œuvre.

Pour illustrer cette approche, nous présentons, figure 1, deux graphiques comparant deux critères de productivité de différents réseaux, à savoir les ratios du volume des effectifs d'une part au nombre de véhicules  $\times$  km annuels, d'autre part au

nombre annuel de passagers pour un certain nombre de réseaux recensés dans l'ouvrage (réf. 3) de l'UITP.

On constate en examinant ces graphiques:

- d'une part une très grande dispersion de ces ratios due aux raisons énumérées ci-dessus,
- d'autre part que l'automatisation intégrale, illustrée par le cas du VAL, entraîne une augmentation significative de la productivité de la main-d'œuvre.

Ce type de comparaison ne permet cependant pas l'établissement d'un bilan exhaustif de l'intérêt de l'automatisation intégrale.

Une deuxième approche consiste à procéder à une comparaison sur une même ligne, en examinant les différences de coûts auxquelles peuvent conduire deux modes d'exploitation différents.

Cette méthode est a priori plus fiable que la précédente, car on peut supposer que la plupart des éléments cités ci-dessus restent stables et ne changent pas lorsque l'on change le mode de conduite des véhicules. Cette approche demande cependant également quelques précautions, car l'intérêt de l'automatisation est, comme on l'a vu, de permettre une meilleure qualité de service, et il faudrait pouvoir tenir compte des effets éventuels sur la clientèle que cette amélioration de la qualité de service peut entraîner.

C'est cette approche que nous allons utiliser dans la suite de cet article où, après avoir examiné quelques bilans publiés dans la littérature, nous allons essayer de détailler sur un cas concret les principaux postes d'un tel bilan.

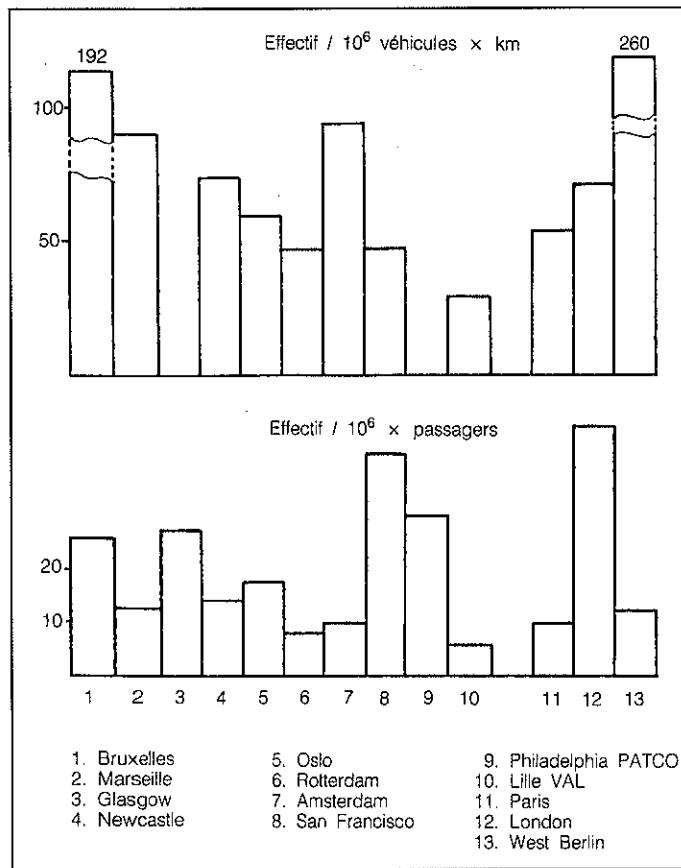


Figure 1: Critères de productivité de différents réseaux (source UITP)



## Quelques exemples de bilans de l'automatisation intégrale

Comme cela a été dit plus haut, la littérature est peu abondante sur ce sujet, et l'auteur n'a trouvé que trois tentatives d'évaluation dans la bibliographie:

### Le système de Kobé (réf. 2)

Rappelons que ce système comporte:

- 3,5 km de voie simple et 2,9 km de voie double,
- 5 stations sur voie simple et 4 stations sur voie double (soit 78 portes palières),
- 12 trains de 6 véhicules.

Les auteurs ont essayé d'évaluer les gains procurés par les automatismes d'un système tel que le KNT, qui proviennent:

- de la suppression du personnel de conduite,
- de la suppression du personnel de station comme conséquence en particulier de l'implantation de portes palières. ces suppressions étant toutefois partiellement compensées par la nécessité de patrouilles itinérantes.

Le bilan, résumé dans le tableau 1, fait apparaître, sur une période de dix-sept ans, un gain global de 4,65 milliards de yens (200 MF environ).

Ce tableau est cependant passablement optimiste car il ne prend pas en compte les coûts de maintenance du matériel supplémentaire, et il prend par contre en compte une diminution très importante des effectifs de stations dont la relation avec l'automatisme intégral n'est pas évidente. Ce bilan doit par conséquent être considéré avec beaucoup de prudence.

### La ligne 2 du métro de Hambourg

Le BMFT (Bundes Ministerium für Forschung und Technologie) a également fait procéder récemment à une étude (réf. 7) portant sur une comparaison sur un modèle de la ligne 2 du métro de Hambourg du coût de différentes alternatives d'automatisation pour une ligne de métro.

Les calculs, effectués sur vingt ans en supposant un taux d'inflation de 5% et un taux d'intérêt de 8%, font apparaître que par rapport à un système non automatisé, la conduite automatique intégrale entraîne un gain de 446 000 DM/an, soit environ 1,7 MF/an, en y incluant une économie d'énergie de l'ordre de 15% liée à une amélioration de la régularité de la ligne qui permet, grâce à une réduction des temps d'arrêt en station, de réduire la vitesse en ligne.

Les autres niveaux d'automatisation ne font pas apparaître de gains.

### La ligne D du métro de Lyon

En France, une évaluation a été faite récemment à l'occasion du projet d'automatisation de la ligne D du métro de Lyon par la SEMALY pour comparer un système avec conduite automatique à un conducteur, et un système à conduite automatique intégrale (réf. 5; voir également l'article de MM. Teillon et Pernot dans ce numéro de RTS).

Elle conduit au bilan global suivant:

- Surcoût d'investissements dus à l'automatisme intégral: de l'ordre de 200 MF.
- Gains annuels sur les frais d'exploitation: 9,6 MF.

Le bilan est nettement moins favorable que les bilans de Kobe et du BMFT, mais il faut prendre en compte le fait que la décision d'adopter la conduite automatique intégrale a été prise tardivement, alors que la construction de la ligne était entreprise, ce qui a entraîné des surcoûts importants, notamment dans le domaine des études; en outre, ce bilan tient compte d'une refonte du PCC des trois lignes A, B, C, qui n'est pas directement liée au choix du mode de conduite de la ligne D.

Tableau 1: Métro de Kobé - Bilan de l'automatisme intégral en milliards de yens (1 yen = 0,04 franc)

Investissements initiaux supplémentaires:					
Portes palières .....				0,2	
Equipements de pilotage automatique:					
— embarqués .....				0,4	
— au sol .....				1,3	
Total .....				1,9	
Gains sur les effectifs par rapport à un métro classique					
	Métros conventionnels		KNT (programme initial)	Réduction d'effectifs	
	pour 30 000 passagers/jour	Pour 60 000 passagers/jour		Pour 30 000 passagers/jour	Pour 60 000 passagers/jour
Effectifs embarqués:					
— conducteur .....	16	23	0	— 16	— 23
— accompagnateur .....	16	23	0	— 16	— 23
Effectifs de station .....	52	52	4	— 48	— 48
Patrouille .....			16	16	16
Total .....	84	98	20	— 64	— 78
Bilan global sur 17 ans avec une hypothèse de:					
— taux d'intérêt: 6% par an					
— taux d'augmentation de salaire: 5,8% par an					
— coût des investissements supplémentaires .....				— 2,926	
— gains cumulés sur les salaires .....				+ 7,576	
Gain total .....				+ 4,650	

# Etude détaillée des différents postes du bilan de l'automatisation intégrale d'une ligne de métro

Compte tenu de la difficulté de trouver un tel bilan détaillé dans la bibliographie, il nous a paru utile d'essayer d'en établir un en prenant comme référence une ligne de métro comparable à la ligne n° 1 du métro de Lille, dont nous rappelons ci-dessous les caractéristiques principales:

- longueur: 13 km,
- nombre de stations: 18,
- nombre de rames: 38,
- intervalle minimum: de l'ordre de 1 minute.

Le problème posé consiste à comparer les bilans des coûts d'investissements et des coûts d'exploitation pour les deux modes d'exploitation suivants:

- le mode 1: conduite à un seul agent, avec une installation de pilotage automatique classique du type Métro de Paris par exemple. Nous prenons ce mode comme référence parce que c'est le plus répandu actuellement, et qu'il permet d'atteindre des performances sensiblement identiques au mode 2 en matière de qualité de service;
- le mode 2: conduite automatique intégrale.

On prend comme hypothèses pour cette comparaison:

- que les caractéristiques générales de la ligne restent les mêmes dans les deux cas: mêmes infrastructures, même type de matériel roulant, mêmes configurations de rames,
- que la demande, ainsi que l'offre, ne changent pas, c'est-à-dire que les fréquences des rames, l'amplitude des périodes de service — ici de l'ordre de vingt heures — et les nombres de véhicules  $\times$  km offerts sont les mêmes dans les deux cas. Cette hypothèse est acceptable dès lors que dans les deux cas la ligne est pilotée automatiquement la plus grande partie du temps, et que l'on prévoit un nombre suffisant de conducteurs pour satisfaire à cette condition sur l'offre dans le cas 1,
- que la politique de l'entreprise en matière de péage, de contrôle des usagers et de prévention de la fraude est la même dans les deux cas.

Les éléments qui diffèrent dans le bilan sont par conséquent:

- Au niveau des investissements: les coûts respectifs des installations de pilotage et de signalisation fixes et embarquées dans chacun des cas envisagés — auxquels il faut ajouter le coût d'une protection des quais dans le cas 2.
- Au niveau des coûts d'exploitation: les coûts respectifs des effectifs de conduite et des effectifs de surveillance au PCC, de contrôle et d'intervention en ligne, ainsi que les coûts respectifs de la maintenance des équipements de conduite et de signalisation fixes et embarqués.

On peut noter que le bilan que nous allons établir serait également valable pour une ligne de mêmes caractéristiques générales, mais ayant des matériels roulants différents, telles que la ligne D de Lyon, les seuls équipements qui diffèrent dans la liste que nous venons d'établir étant les protections de station (portes palières ou autres), plus coûteuses dans le cas de stations destinées à des rames à quatre voitures.

## Investissements

Les différences de coûts d'investissement entre une ligne à conduite automatique intégrale, et une ligne plus classique à conduite à un seul agent et dotée d'une installation de pilotage automatique tiennent au fait que dans le 1<sup>er</sup> cas:

- tous les équipements sont doublés pour garantir à la ligne une disponibilité qui, dans le deuxième cas, peut être sauvegardée par la présence du conducteur,
- l'absence de conducteur se traduit par un nombre beaucoup plus important de téléméasures et de télécommandes échangées entre les véhicules, la voie et le PC et implique d'une part des liaisons beaucoup plus performantes entre les différents équipements au sol et le PC, ainsi qu'une capacité de traitement plus importante du PC,
- une protection doit être prévue dans les stations contre les risques de chutes de passagers sur les voies, ou d'entraînement de passagers coincés par les portes de véhicules.

Lorsque le VAL a été mis en service, il était considéré comme pratiquement indispensable d'assurer cette protection par des portes palières, ce qui permet, soulignons-le, outre d'améliorer le confort des passagers, d'atteindre un niveau de sécurité bien supérieur à celui qui est offert dans des métros conventionnels.

Dans ce cas, la nécessité d'un arrêt précis des véhicules devant les portes palières implique des équipements électriques particuliers d'arrêt en station, tant à bord qu'au sol, qui sont chargés de gérer la séquence d'arrêt et l'ouverture des portes.

Cependant, les idées évoluent dans ce domaine et plusieurs métros automatiques en service ou en construction — par exemple ceux de Vancouver, de Miami, de Détroit et de Lyon — sont conçus sans portes palières. Dans ce cas, la règle admise généralement est que l'on doit garantir aux passagers un niveau de sécurité au moins égal à celui qui est assuré par un conducteur, ce qui implique, d'une part un dispositif de détection efficace des chutes sur la voie, le long des quais de station, d'autre part un dispositif de protection — tel que des bords sensibles par exemple — contre les risques d'entraînement de passagers par les portes de véhicules. En toute rigueur, c'est cette dernière option qu'il conviendrait de prendre en compte dans cette étude comparative si nous cherchons à nous situer, dans chacun des modes de conduite en cause, à qualité de service égale. Nous avons cependant mentionné également dans la figure 5 l'option portes palières.

- l'absence de conducteur impose enfin d'implanter des équipements de pilotage automatique dans les zones de manœuvre et de garage, alors qu'on s'en dispense en général lorsqu'il y a un conducteur à bord.

A ces investissements matériels, il convient d'ajouter en outre des investissements en études et en essais, en remarquant que la mise en service d'une ligne automatique exige notamment des essais d'intégration et des études de sécurité sans commune mesure avec ce qui est exigé pour une ligne classique.

En contrepartie, un système à conduite manuelle doit en général être équipé d'une signalisation latérale ou en cabine plus lourde qu'un système à conduite automatique intégrale où la reprise en manuel est considérée comme un événement très rare pendant lequel on peut tolérer une certaine dégradation de la qualité de service.

On peut noter en outre que la présence d'une cabine de conduite diminue légèrement la place offerte aux usagers; même en tenant compte du gain de volume entraîné par la réduction des équipements de pilotage automatique, c'est au moins trois places à chaque extrémité, soit 3% de la capacité de pointe dans un véhicule du type «VAL», et cinq à six places dans un métro de type Lyon, soit 1,5% de la capacité de pointe, qui sont ainsi perdues. Pour évaluer l'incidence de cette

réduction de capacité, nous supposerons que le coût du matériel roulant est sensiblement proportionnel au nombre de places offertes, ce qui conduira à appliquer ces pourcentages au coût du parc pris en compte.

L'évaluation précise de ces différences de coûts d'investissements est une opération difficile, étant donné que les cas concrets auxquels on peut se référer sont tous des cas spécifiques, et qu'on ne peut sans grandes précautions comparer les coûts de deux lignes construites dans des villes et à des dates différentes, par des constructeurs différents. Une telle évaluation demanderait en pratique une étude complète de type «Avant-Projet Sommaire».

Nous nous sommes contentés dans le tableau 1 de procéder, à partir d'éléments provenant de différents projets français et étrangers et de différents constructeurs, à une estimation très approchée aboutissant à des «fourchettes» de prix qui nous paraissaient réalistes.

En particulier, en ce qui concerne les protections de quais de stations, on a supposé que le coût des dispositifs de détection de chutes sur la voie, et d'arrêt automatique de trains serait de l'ordre de grandeur du coût des systèmes d'arrêt précis en station imposés par l'option «porte palière». La différence de coût entre cette option et celle sans portes palières se limite alors au coût de ces portes.

La limite supérieure de la fourchette correspondrait à des premières réalisations, à caractère prototype comme la ligne D de Lyon, et la limite inférieure à un début de série (ligne 1 bis de Lille par exemple).

## Coûts d'exploitation

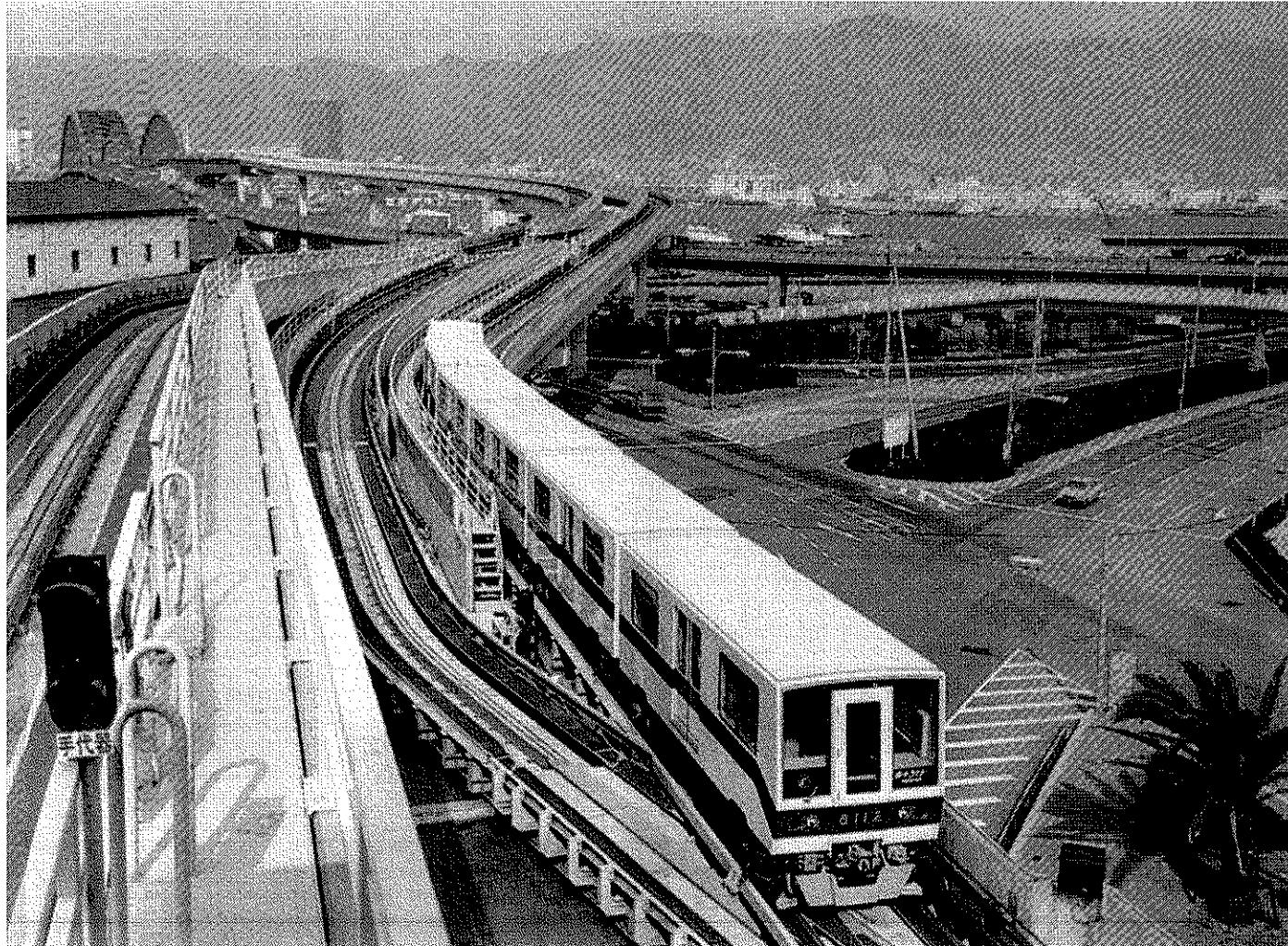
### Personnel

Dans le cas 1 et le cas 2, les différences en matière de personnel portent essentiellement sur:

— les effectifs du PCC: l'absence de conducteurs à bord implique qu'un volume beaucoup plus important d'informations soit traité au PCC, ce qui devrait exiger dans le cas 2 entre 1 et 1,5 agents supplémentaires en moyenne, soit un effectif de l'ordre de 6 à 9 personnes en plus;

— les effectifs de conduite: pour une amplitude de la journée de l'ordre de vingt heures et pour les fréquences pratiquées sur la ligne 1 de Lille, nous avons supposé que la présence d'un conducteur à bord se traduit par un effectif supplémentaire égal environ à 3 fois le nombre de trains en service, chiffre couramment admis sur des réseaux existants. En outre, compte tenu du temps mis par le conducteur pour changer de cabine de conduite à chacun des terminus de la ligne, que l'on peut estimer à environ une minute, le maintien de la fréquence maximale aux heures de pointe implique durant ces périodes un effectif supplémentaire d'au moins un conducteur en terminus, représentant six postes permanents (cette obligation n'existerait pas dans le cas plus rare d'une ligne avec terminus en boucle). On arrive ainsi à 120 personnes pour 38 trains auxquelles il convient d'ajouter un effectif d'encadrement et de formation de l'ordre de 6 à 10 personnes;

Le métro de Kobé à l'arrivée de l'île de Portisland



— en ce qui concerne le personnel de contrôle, dès lors qu'une certaine présence minimale est assurée, on peut supposer que ces effectifs ne sont pas étroitement liés au mode d'exploitation, avec ou sans conducteur, mais qu'ils dépendent principalement du volume du trafic et de la politique de l'entreprise en matière de lutte contre la fraude;

— l'impact de l'automatisation de la conduite sur les besoins en personnel d'intervention en ligne ou en station n'est pas très facile à apprécier; d'un côté, le volume de matériel en place est plus important dans le cas n° 2, et par conséquent le nombre de défaillances doit être plus élevé; d'un autre côté, des redondances sont prévues presque systématiquement dans ce cas, ce qui limite les besoins d'intervention d'urgence. L'expérience acquise sur le VAL permet de penser que le passage à l'automatisme intégral n'implique pas d'augmentation significative de ces effectifs d'intervention.

Ces deux remarques sur le personnel de contrôle et d'intervention sont corroborées par l'examen comparatif des effectifs d'exploitation de la ligne 1 de Lille et de l'ensemble des lignes A et B de Lyon (tableau 2), qui ont une longueur et un nombre de stations comparables. Ce tableau fait apparaître que les effectifs de contrôle et d'intervention de Lille sont légèrement inférieurs à ceux de Lyon; la différence peut cependant s'expliquer par l'importance du trafic voyageurs de Lyon (près du double de celui de Lille) et l'importance du parc de véhicules (96 contre 76 voitures) comme le montre l'examen du ratio:

$$\frac{\text{effectifs de contrôle}}{\text{nombre de véhicules}}$$

qui est supérieur d'environ 10% à Lille.

En tout état de cause, nous pouvons considérer que les variations de ces types d'effectifs sont faibles entre les cas 1 et 2, et de l'ordre de quelques unités.

Finalement, en considérant que les augmentations d'effectifs du PC et du personnel d'intervention dans le cas 2 correspondent approximativement au personnel d'encadrement, on peut admettre que les différences de personnel d'exploitation entre le cas 1 et le cas 2 se réduisent au personnel de conduite des N rames en service dans le cas 2 complété d'une réserve de six personnes pour assurer les rotations en terminus, soit 3(N + 2) personnes.

## Maintenance

En ce qui concerne enfin la maintenance, on peut supposer que les coûts sont liés au volume de matériel en place, et se situent autour de 4% de ces matériels, ratio assez proche des ratios actuels tant à Lille qu'à Lyon.

## Bilan global

On parvient ainsi au tableau comparatif suivant (tableau 3) qui fait apparaître les principales différences de coût existant entre les deux modes d'exploitation d'une ligne comparable à la ligne n° 1 du métro de Lille, avec une option sans portes palières. L'option avec portes palières s'en déduit aisément en ajoutant dans la colonne 2 un poste d'investissement de 20 MF (rames de deux voitures) à 40 MF (rames de quatre voitures), complété du poste «maintenance» correspondant.

La plupart des bilans concernant ce type d'équipements se font en général sur une période de vingt ans, qui correspond sensiblement à leur durée de vie moyenne.

Pour procéder à un tel bilan, il convient de se fixer un taux d'actualisation à appliquer aux dépenses et revenus annuels prévus sur ces 20 ans.

**Tableau 2: Effectifs des métros de Lille et Lyon (lignes A et B) ventilés par service**

	Lille	Lyon (lignes A + B)
<i>Exploitation</i>		
Encadrement .....	2	2
PCC - Intervention .....	37	29
Contrôle - Inspection .....	37	27
Conducteurs .....	0	77
Formation .....	6	
<i>Service technique</i>		
Encadrement, planning, magasins .....	9	
Voie et bâtiments .....	20	17
Installations fixes .....	22	90
Matériel roulant .....	31	74

**Tableau 3: Différences de coûts d'investissement et d'exploitation d'une ligne de type de la ligne 1 de Lille, avec les modes d'exploitation (1) et (2).**

Postes du bilan	Coûts supplémentaires (MF)	
	Variante (1)	Variante (2)
	(PA + 1 agent)	(Automatisme intégral)
<b>1. Investissements:</b>		
1.1. Matériel roulant		
a) Surcoût dû à la perte de capacité liée à la cabine de conduite (pour 38 rames) .....	12 MF (3)	20 à 30 MF
b) Equipements de PA (1) (pour 38 rames) Δ coût .....		60 à 100 MF
1.2. Equipements fixes de PA (y compris PCC et câblage) .....		68 à 118 MF
Δ total équipements (col. 2 - col. 1) .....		10 à 30 MF
1.4. Etudes - essais .....		78 à 148 MF
Surcoût total de la variante 2 .....		
<b>2. Exploitation - Maintenance (Δ coûts annuels)</b>		
2.1. Exploitation: 120 conducteurs (2) .....	15,6 à 18 MF	2,7 à 4,7 MF
2.2. Maintenance (4% du coût des équipements) .....		
Surcoût total annuel de la variante 1 .....	10,9 à 15,3	

(1) base: Δ coût unitaire ~ 0,5 à 0,8 MF/rame (2) base: coût unitaire = 130 kF/an/agent à 150 kF/an/agent (3) base: coût unitaire d'un élément de deux voitures: 10 MF

Tableau 4: Bilan financier de l'automatisme intégral d'une ligne de métro sur vingt ans

Taux d'actualisation	Bénéfice actualisé sur 20 ans (MF)					
	hypothèse haute		hypothèse moyenne		hypothèse basse	
	a	b	a	b	a	b
3%	+ 156	+ 124	+ 93	+ 39	+ 19	- 46
5%	+ 122	+ 91	+ 63	+ 13	- 6	- 67
10%	+ 65	+ 38	+ 15	- 32	- 36	- 101

a: sans portes palières b: avec portes palières

Les taux d'actualisation pratiqués en ce moment dans les calculs économiques se situant entre 5 et 10%, nous avons appliqué ces 2 taux aux valeurs limites figurant au tableau précédent, ainsi qu'un 3<sup>e</sup> taux un peu plus modéré de 3% tenant compte du fait que l'essentiel des économies dans le cas 2 est constitué de salaires soumis à une certaine inflation.

Le tableau 4 fait apparaître que le bilan financier de l'automati-

tisation intégrale dans le cas de figure pris comme référence et en se plaçant dans des hypothèses moyennes de coût, est nettement positif avec l'option «sans portes palières», mais est naturellement plus proche de l'équilibre lorsque l'on adopte cette option. Plutôt négatif dans le cas le plus pessimiste correspondant par exemple à une première réalisation telle que la ligne D de Lyon, ce bilan devient très favorable, et ceci quels que soient les options et le taux d'actualisation choisi, lorsqu'on se situe à la limite basse de la fourchette de coûts d'investissement qu'il nous a paru raisonnable d'envisager.

Il est intéressant de noter que les résultats correspondant à l'hypothèse moyenne sont assez proches de ceux de l'étude allemande (réf 7).

*Remarque:* Le cas que nous venons d'analyser est un cas d'école dont l'avantage est d'éliminer toute référence à la demande, puisqu'on suppose que la qualité de service reste identique dans les deux modes qui font l'objet de la comparaison.

Dans la pratique, c'est un peu une vue de l'esprit d'imaginer qu'on exploiterait une ligne en conduite manuelle avec les mêmes fréquences qu'une ligne sans conducteurs, et il serait plus réaliste pour le cas 1 de fixer un mode d'exploitation avec des trains plus longs — de trois ou quatre voitures — et des intervalles multipliés par 1,5 ou 2. Dans ce cas, les gains sur le personnel de conduite seraient plus faibles, mais il faudrait tenir compte dans le poste «investissement» du bilan du coût d'allongement des stations.

## Variations de ce bilan en fonction du parc de véhicules

Pour une ligne donnée, ce bilan peut évoluer très sensiblement avec le volume de matériel roulant en service. On remarque en effet qu'au voisinage d'une situation d'exploitation donnée, si l'on fait varier le nombre de trains en service:

— les postes d'investissements 1.2., 1.3. du tableau 3 ne varient pas. Seuls changent le poste 1.4. (études-essais) qui varie peu et dont nous négligerons les variations et les postes 1.1.a et 1.1.b qui varie proportionnellement au nombre N de trains; 1.1.a comme: 0,3 N MF et 1.1.b comme (0,5 à 0,8) N MF.

L'ensemble de ces deux postes se traduit donc par un surcoût de l'automatisation intégral:  $\Delta \text{ coût} = (0,2 \text{ à } 0,5) N \text{ MF}$ .

— en ce qui concerne le poste «Exploitation et Maintenance», le personnel PCC doit rester inchangé, au moins pour des variations modérées de N.

On peut admettre également en première approximation que les effectifs de contrôle et d'intervention restent toujours comparables dans les 2 modes d'exploitation.

Les différences de coûts d'exploitations se résument donc au poste «conducteurs» qui évolue comme 3(N + 2).

Enfin dans le poste «maintenance» seul varie le coût de la maintenance du matériel roulant, égal à:

$$0,04 (0,5 \text{ à } 0,8) \times N \text{ MF/an}$$

On voit donc qu'à la marge, c'est-à-dire pour chaque rame supplémentaire, ont doit équilibrer un poste d'investissement de 0,5 à 0,8 MF par des gains annuels sur l'exploitation de:

$$(390 \text{ à } 450) - (20 \text{ à } 32) \text{ KF soit } (358 \text{ à } 430) \text{ KF}$$

Toute nouvelle rame ajoutée au parc conduit donc à un rééquilibrage du bilan très favorable à l'automatisation. C'est ce que nous avons cherché à illustrer sur la figure 2 qui montre comment se situent, par rapport aux coûts des équipements

fixes supplémentaires nécessités par l'automatisation intégrale et qui varient très peu avec la taille du parc, les économies liées au matériel roulant, c'est-à-dire la différence entre les gains liés à l'absence de conducteurs, et les coûts d'achat et de maintenance des équipements de pilotage automatique embarqués.

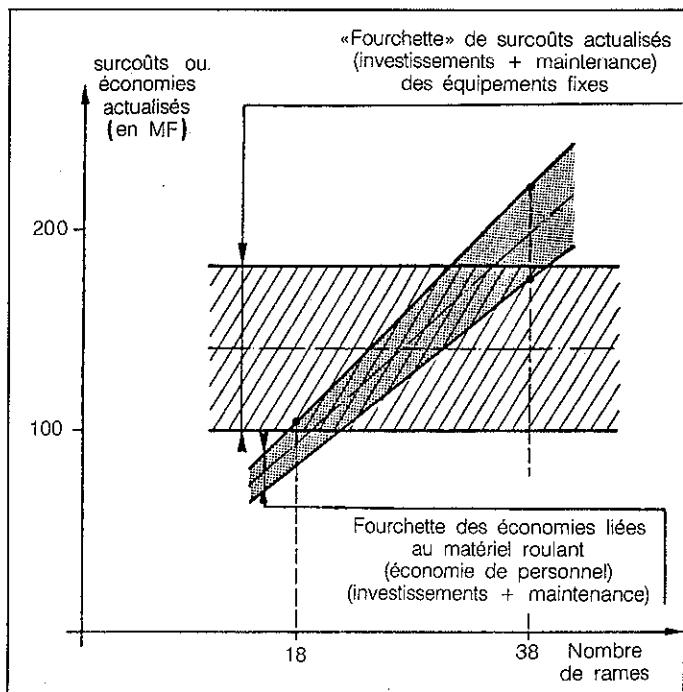


Figure 2: Variation du bilan de l'automatisation intégrale (option sans portes palières) avec la taille du parc de rames (actualisation sur vingt ans avec un taux d'actualisation de 5%)

Cette figure fait apparaître qu'au-delà de quarante rames, c'est-à-dire pour des fréquences de l'ordre de la minute sur la ligne prise comme référence, le bilan actualisé de l'automatisation intégrale est positif, même pour la limite supérieure de la fourchette de coût que nous avons prise, tandis qu'au-dessous d'une vingtaine de rames correspondant à une fréquence maximale de l'ordre de deux minutes, ce bilan n'a aucune chance d'être positif dans les conditions actuelles de coût des automatismes.

## Cas d'un réseau à plusieurs lignes

On peut remarquer que dès que l'on passe du stade d'une

ligne unique à un réseau de deux lignes ou plus, le bilan précédent doit encore s'améliorer sensiblement.

Sur le plan des investissements, le surcoût dû au PCC est moins élevé pour la 2<sup>e</sup> ligne, de même que le surcoût «études et essais»: il ne serait pas déraisonnable d'espérer un gain de l'ordre de 10 à 15 MF sur l'ensemble de ces deux postes.

Sur le plan de l'exploitation, l'évolution doit être également favorable; il est en effet vraisemblable que les effectifs du PC, de même que les effectifs de contrôle et d'intervention ne sont pas doublés lorsqu'on double le nombre de lignes, ce qui peut atténuer les écarts d'effectifs entre le mode 1 et le mode 2.

## Conclusion

L'exposé qui précède montre que si le bilan économique de l'automatisme intégral se révèle nettement positif — au moins pour des lignes dont la fréquence élevée exige un parc important —, les considérations de coût ne constituent pas néanmoins pour l'instant l'argument le plus décisif en faveur de ce mode de conduite, surtout si l'on adopte une option avec portes palières.

En pratique, comme le confirme l'exemple de la ligne D de Lyon, c'est surtout en raison de leur souplesse d'exploitation, des facilités de gestion du personnel qu'ils apportent à l'exploitant, et de la qualité de service qu'ils permettent d'offrir à l'usager que les systèmes à conduite automatique intégrale font actuellement une entrée aussi remarquable sur le marché des transports urbains.

Ce mouvement devrait s'accentuer dans les années à venir pour les raisons suivantes:

- En premier lieu, les progrès de la microélectronique et la généralisation des commandes par microprocesseur devraient conduire à des coûts nettement moins élevés pour les automatismes fixes et embarqués lorsque les coûts de développement de ces techniques seront amortis. Ce développement des applications des microprocesseurs devrait s'accompagner d'un développement d'outils d'aide à la maintenance qui pourrait contribuer à réduire le coût de ce poste du bilan;
- L'apparition de séries de systèmes tels que le VAL devrait également permettre de réduire le poste «études, essais, qualification» des réalisations de systèmes à conduite automatique

intégrale, par une plus grande standardisation de ces systèmes;

— comme le montrent les exemples des métros de Vancouver et de Lyon, l'option «portes palières» pourrait être considérée comme facultative dans les systèmes à conduite automatique intégrale, dans la mesure où l'on aura mis au point des moyens efficaces de détection d'intrusions sur la voie (Il faut toutefois bien insister sur le fait que cette option, dont le coût, au demeurant, reste dans des limites acceptables, au moins pour des lignes nouvelles, et pourrait encore diminuer, offre une protection absolue et inégalable, contre les chutes sur la voie).

Pour toutes ces raisons, on peut espérer atteindre dans un futur relativement proche les conditions correspondant à l'hypothèse la plus favorable du bilan du tableau 3.

— Enfin, on peut remarquer que l'on n'a guère exploré jusqu'à présent l'influence déterminante que peut avoir l'automatisation intégrale sur le développement de modes d'exploitation non conventionnels de lignes de métros fondés sur la possibilité d'utiliser des rames scindables:

- lignes en fourche,
- lignes à service variable en fonction de la zone.

Il existe dans ces domaines des possibilités d'amélioration et de la qualité de service et des coûts d'exploitation qui devraient renforcer encore l'intérêt de la conduite automatique intégrale.

## BIBLIOGRAPHIE

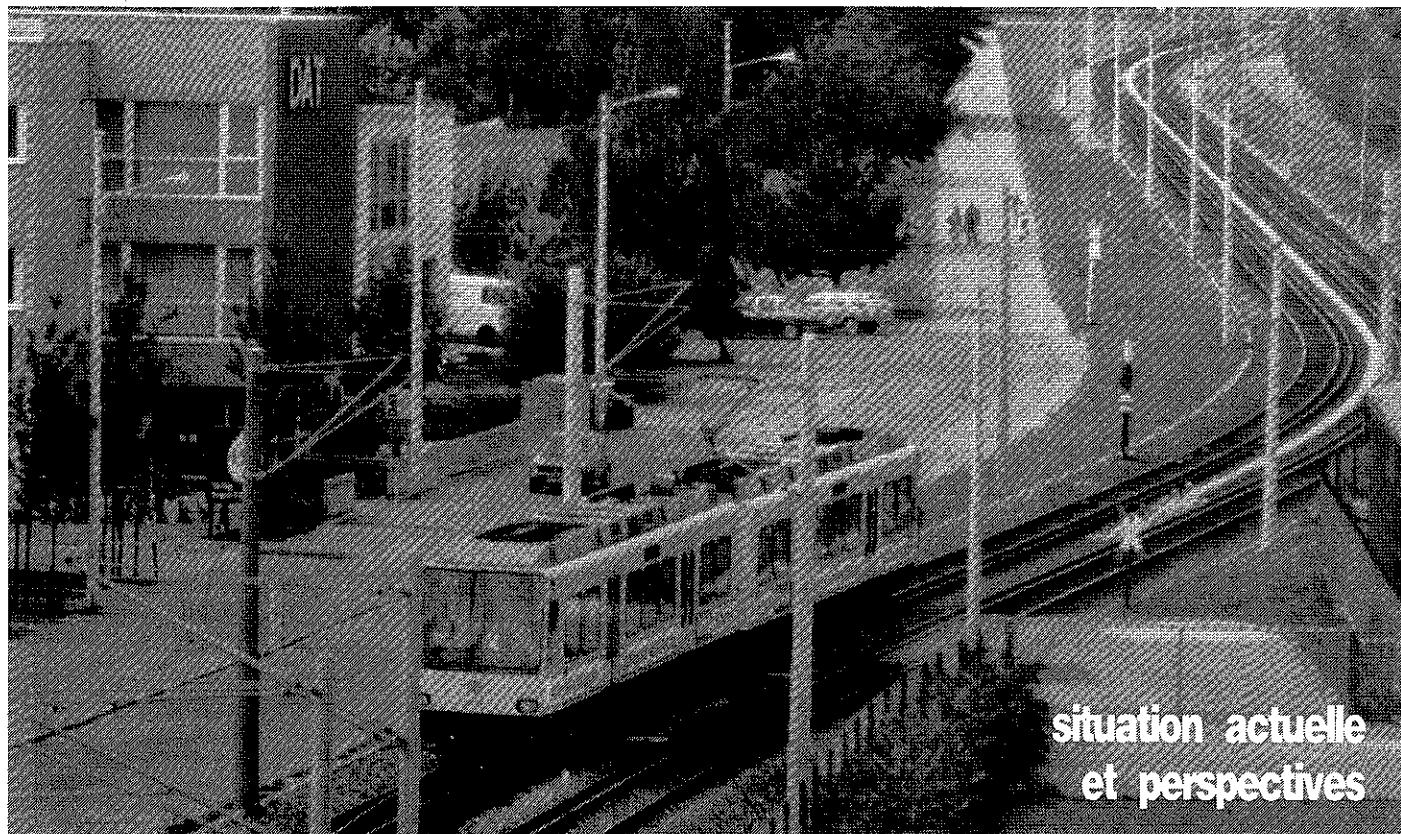
1. *Automatic Train Control in Rapid Transit*. Rapport OTA — United States Congress — May 76.
2. *Kobe new transit system «Portliner» — Experience of unmanned operation* (Okada T.). ASCE Conference on «Automated People Movers» — Miami Mars 1985.
3. *Les métros dans le monde*. UITP — 1983.
4. *The possibility of People Mover cost reduction in Japon* (Tsukio Y.). ASCE Conference on «Automated People Movers» — Miami — Mars 1985.
5. *L'automatisation intégrale d'un métro existant à grand gabarit Métro de Lyon — Magally* (J. Pernot — C. Teillon). Colloque AFCET.PRD 3T — 3-5/02/87.
6. *VAL Automated Guideway Transit: Three Years of Revenue operation* (B. Le Cour Grandmaison). UTA 81th annual Meeting Vancouver — June 1986.
7. *Nutzen — Kosten Untersuchung zum Prozessrechner gesteuerten U-Bahn Automatisierungssystem Hamburg (PUSH)* (D. Wirsching et al.). Nahverkehrsforschung 85.
8. *Les systèmes nouveaux de transport au Japon*. Rapport de mission (P. Prévot). Rapport INRETS-CRESTA — Janvier 1985.

Francis KUHN

Ingénieur d'études  
INRETS-CRESTA

Centre de Recherche et d'Evaluation  
des Systèmes de Transport automatisés

# Les transports urbains guidés de surface



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 type métro léger et les systèmes automatiques en site propre intégral. Exemple: les projets de Toulouse, Strasbourg, Bordeaux, Londres (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:

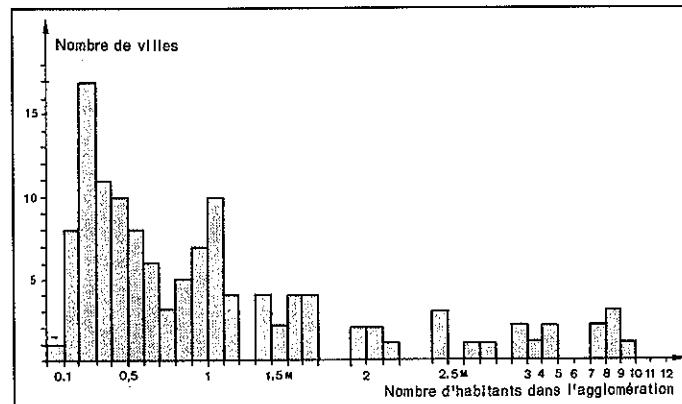


Figure 1: Répartition selon leur taille des villes équipées de métro léger (126 réseaux de tramway ou métro léger, source UITP, 1983)

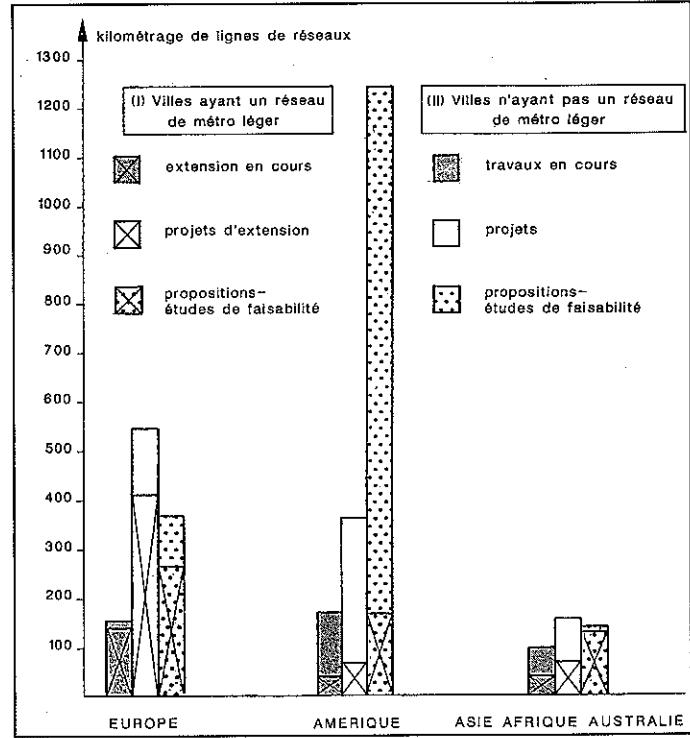


Figure 2: Répartition selon leur taille de villes équipées de métros (79 réseaux de métropolitains, source UITP, 1983)

Figure 3: Etat d'avancement, en kilomètres de lignes, des projets de métro léger dans le monde (source: Jane's Urban Transport 1985 & Railway Gazette International February 1986)

— 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 réservé 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, ou 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%			

*Nota:*

- 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 (Duwag 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.

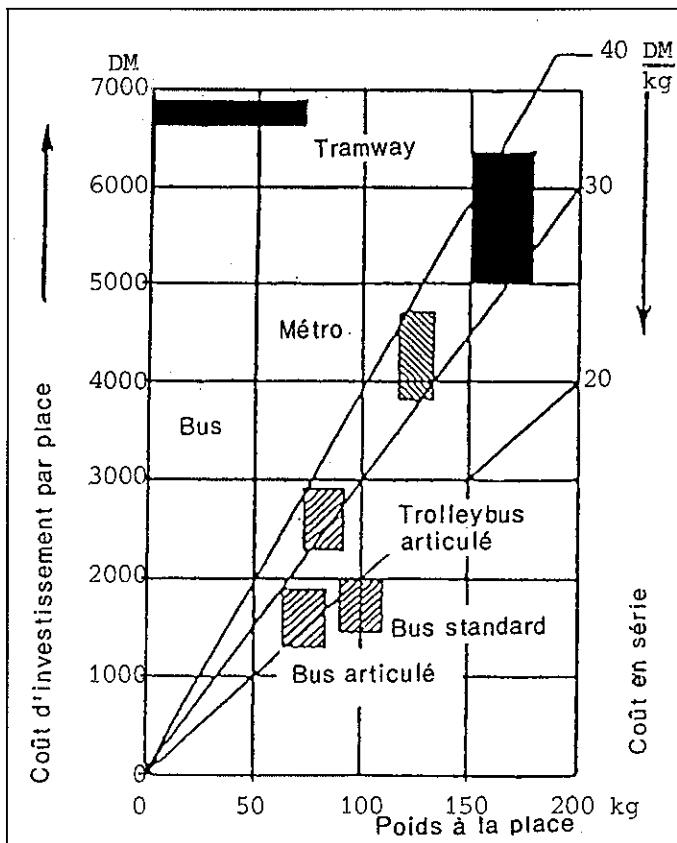


Figure 4: Données de poids et de coût de différents véhicules de Transport (source: Nahverkehrs Forschung 1983).

## 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 <sup>2</sup> )	168 places dont 60 assises
— en charge maximale (6,6 personnes par m <sup>2</sup> )	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

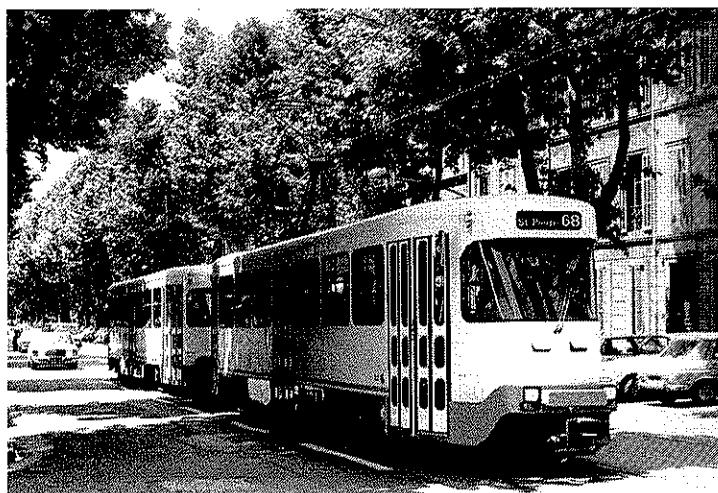


Tableau 4: Dispositifs de régulation du trafic

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
Villes							
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 Bruxelloise 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/m<sup>2</sup>); 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 impraticables 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

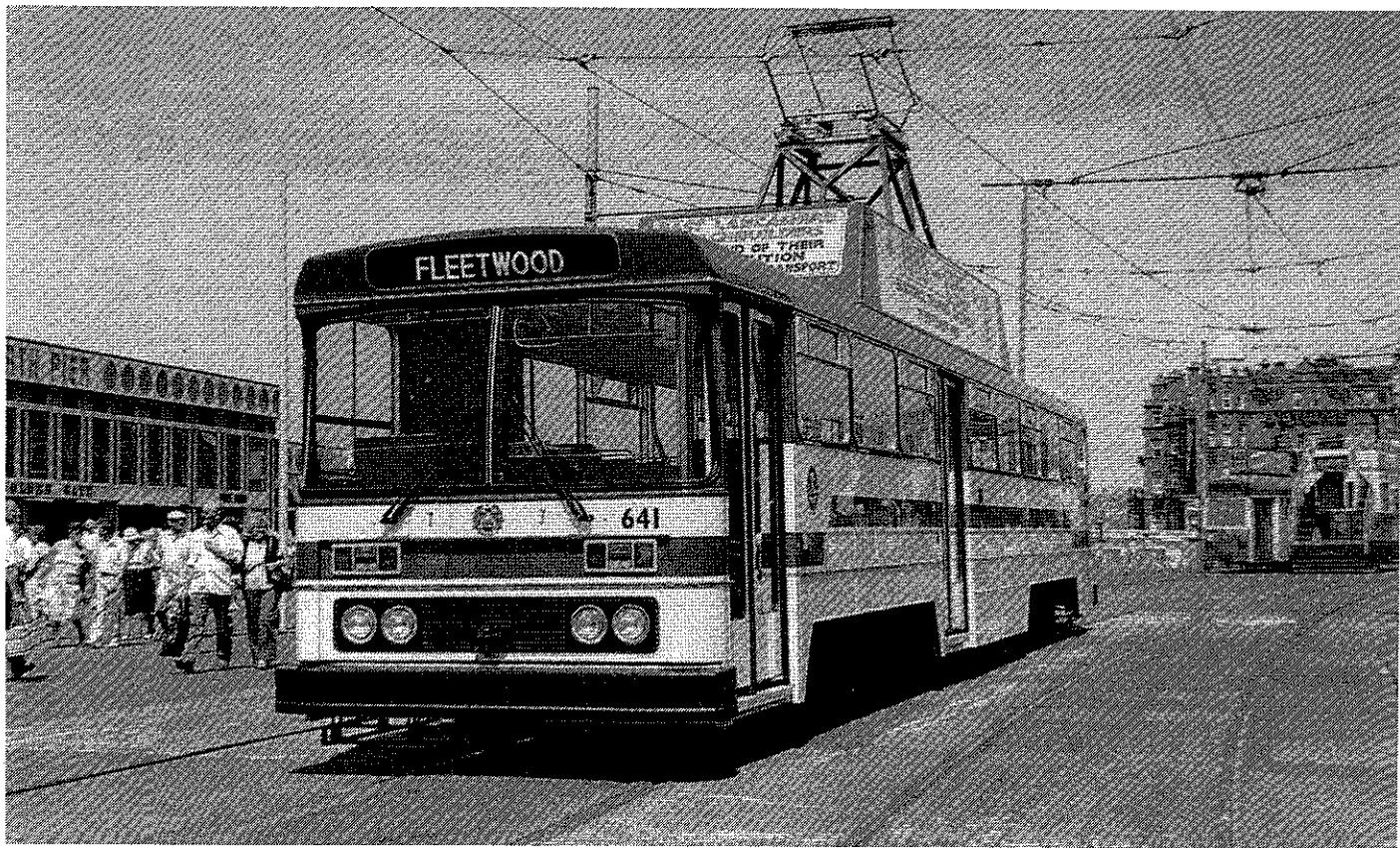
Une étude globale portant sur un ensemble de 26 réseaux allemands sur la période 1970-1980 semble confirmer qu'un aménagement de sites est favorable à la sécurité (tableau 6). Les résultats de cette enquête montrent que malgré l'augmentation de la circulation, 70% des réseaux ayant réalisé des aménagements 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* (Maiterre 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<sup>e</sup> 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.

# Les transports à courte distance: comparaisons, progrès récents

Alain BIEBER

*Directeur de recherche  
chargé de la prospective  
des transports  
INRETS*

Jean-Paul COINDET

*Chargé de recherche  
INRETS-DEST  
Département Economie  
et Sociologie des Transports*

**Un groupe de travail, animé par l'INRETS a procédé à une analyse critique des débouchés des systèmes de transport hectométrique aujourd'hui disponibles et proposé des critères d'appréciation de la notion d'opportunités de développement. Il conclut à la nécessité de l'internationalisation des débouchés.**

**Une analyse fonctionnelle des diverses filières en présence (trottoirs roulants, semi continus, navettes) met en lumière leur complémentarité en termes de distances interstations et de capacité.**

**Enfin des comparaisons ont été effectuées sur la base des données technologiques qui ont été accessibles au groupe de travail.**

## Des transports hectométriques: pour quoi faire?

Le formidable développement des escaliers mécaniques est une réponse logique à la pénibilité ressentie à gravir des escaliers. En revanche, les courts trajets horizontaux s'effectuent facilement à pied. C'est vraisemblablement la raison pour laquelle la mise en œuvre de systèmes de transport hectométrique a été aussi rare si l'on excepte le cadre des très grandes manifestations internationales où le caractère ludique prend une importance particulière.

En milieu urbain, les pentes sont relativement rares mais créent un besoin de transport à courte distance ainsi que le prouve la présence historique de funiculaires dans certaines villes. Plus récemment, les décideurs se sont intéressé aux systèmes de transport à courte distance pour plusieurs raisons:

- existence de techniques dérivées de l'industrie des équipements de sports d'hiver;

- révision des schémas d'urbanisme des très grandes villes, souvent en liaison avec la mise en service de lignes de transport lourd;
- développement de très grands parcs de stationnement;
- développement des terminaux multiples dans les aéroports;
- croissance des coûts de personnel dans l'exploitation des autobus;
- développement de très grands centres de loisirs;
- demande d'un confort accru de la part des voyageurs, plus particulièrement des personnes âgées.

Le présent article reprend les principaux résultats obtenus par un groupe de travail animé par l'INRETS. Il comporte trois points essentiels:

- présentation d'une typologie des techniques;
- comparaison de quelques performances;
- brève discussion des opportunités de développement.

## Typologie des techniques des systèmes

### Champ de l'étude

La gamme de distances considérée par les promoteurs des systèmes est très variable. Une définition complète devrait être fondée sur la disposition des stations et leur distance. Nous nous occuperons toutefois seulement de systèmes fonctionnant point à point, dans une plage de distances ne nécessitant pas l'implantation de stations intermédiaires ou, le cas échéant, comportant une station située à mi-parcours, de façon à autoriser la disposition classique de la voie unique. Nous avons considéré que la plage de distances la plus vraisemblable est de 0 à 2 000 mètres.

### Les familles de systèmes

La comparaison porte sur trois grandes familles de systèmes:

- les trottoirs roulants accélérés;
- les navettes (systèmes discontinus, «funiculaires horizontaux»);
- les systèmes semi continus.

### Les trottoirs roulants accélérés

Les trottoirs roulants accélérés sont dérivés des trottoirs roulants classiques dont ils conservent les caractéristiques d'entrée et de sortie, à savoir une vitesse n'excédant pas 3 km/h dans ces zones. Leurs possibilités d'accélération et de décélération permettent d'atteindre des vitesses maximales de trois à cinq fois la vitesse d'entrée.

Les principaux avantages fonctionnels de cette famille sont naturellement la continuité et leur forte capacité, avec des débits maximum de 8 000 à 10 000 passagers par heure pour des trottoirs d'environ un mètre de largeur. La vitesse est limitée à environ 12 km/h mais, ainsi que l'ont montré les essais sur prototype, rien n'empêche les usagers d'heure creuse de marcher sur le trottoir pour atteindre une vitesse de 15 à 16 km/h dans la mesure où la main courante permet de matérialiser les distances à respecter avant la zone de décélération.

## Les navettes

Les navettes sont constituées de un ou plus fréquemment deux véhicules circulant en va et vient. Pour des vitesses n'excédant pas certaines valeurs, fixées habituellement aux alentours de 40 km/h, mais pouvant le cas échéant évoluer dans le futur, la propulsion peut être assurée par câble. Il s'agit alors du concept de la voie active mécanique. On englobe ainsi dans cette catégorie les «funiculaires horizontaux» pouvant être utilisés sur des sites plus longs et moins pentus que les funiculaires traditionnels.

Les navettes à motorisation classique ou par moteur linéaire peuvent, si nécessaire, atteindre des vitesses plus élevées.

Un avantage de ces systèmes est la possibilité d'exploitation en voie unique: en cas de navette double un évitement est nécessaire à mi-parcours. Nous commentons ci-après leurs performances.

## Les systèmes semi continus

Les systèmes semi continus sont fondés sur le principe d'une boucle parcourue en sens unique par des véhicules tractés par câble, avec de très courts intervalles de passage. De tels systèmes sont par définition exploités en voie double.

La semi continuité résulte de la fréquence très élevée ainsi que du fait que les véhicules défilent en station à très faible vitesse (environ 0,3 m/s). En théorie, l'arrêt complet en station n'est pas impossible mais doit être très court compte tenu des très fai-

bles intervalles: de fait, les systèmes de cette famille ne sont généralement pas arrêtés en station.

Le principal avantage de la famille est la suppression de l'attente grâce à la très forte fréquence, combinée à une capacité raisonnable, particulièrement sur les distances les plus longues comme nous le verrons ci-dessous.

Nous disposons en France de systèmes développés et de projets de mise en œuvre représentant les trois familles.

1. **Le TRAX**, développé par les Ateliers et Chantiers de Bretagne à Nantes, en étroite coopération avec la RATP, est un trottoir roulant accéléré, conçu avec un rapport multiplicateur de 4. Des sites ont été envisagés à Paris et aux Etats-Unis mais aucune décision n'a été prise.

2. **La NAHSAT** (Navette Hectométrique sans Attente) fut développée d'abord par Creusot-Loire, puis par SGTE, en collaboration avec la SNCF. Ce funiculaire horizontal a vu un projet de mise en œuvre entre la gare de l'Est et la gare du Nord à Paris remis en cause par l'Etat; on peut toutefois penser que ce projet devra être reconstruit dans l'avenir.

3. **Le SK**, développé par Soulé-de Kermadec a été mis en service à Villepinte et à Vancouver. Il s'agit d'un système semi continu de seconde génération construit d'après les enseignements acquis, dans les années soixante, au cours du développement d'autres dispositifs, essentiellement Poma et VEC (voir article dans le numéro 11 de la Revue RTS).

## Comparaison des caractéristiques fonctionnelles

La difficulté de l'évaluation technologique est accentuée par le fait que ces systèmes sont encore à leurs débuts. Nous avons toutefois tenté de définir des indicateurs de performances objectifs. En ce qui concerne les coûts, nous n'avons pu disposer d'aucune indication réellement fiable.

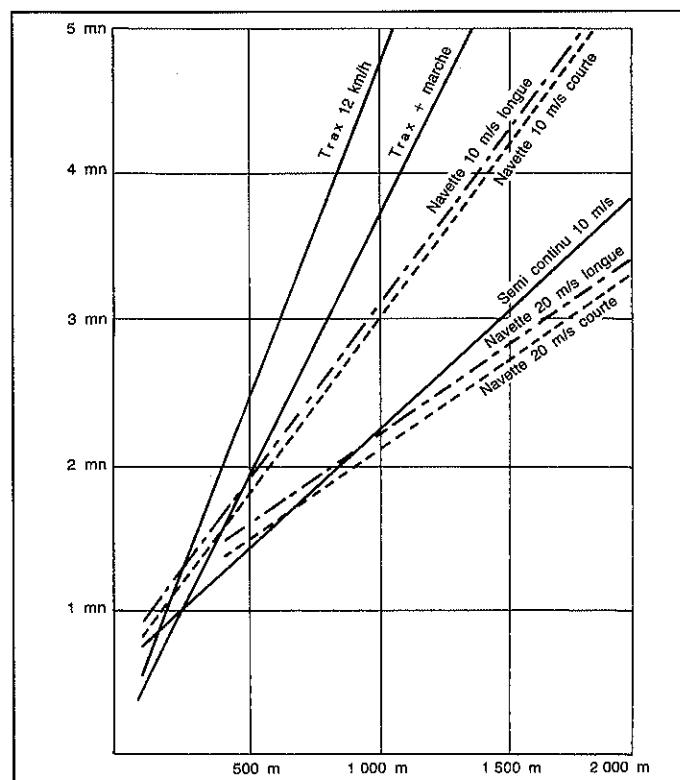


Figure 1: Temps d'entrée-sortie selon la distance d'interstation

### Le temps d'entrée-sortie

Le temps d'entrée-sortie (temps d'accès + temps véhicule + temps de sortie), indicateur de performance le plus simple, est très important pour deux raisons:

- il donne une bonne idée de la qualité de service,
- il est un déterminant de la capacité pour les systèmes de type navette.

La figure 1 montre les principaux résultats de notre analyse.

Nous avons comparé les trottoirs roulants accélérés, les navettes à câble à 10 m/s, les navettes actives à 20 m/s et les semi continus à câble à 10 m/s (vitesse généralement considérée comme maximale pour les systèmes jusqu'à présent développés dans cette famille).

Le tableau ci-dessous montre que les performances peuvent varier considérablement.

### Comparaison des temps d'entrée-sortie pour les différentes familles de systèmes

Distance interstations	Temps d'entrée-sortie en minutes			
	500 m	1 000 m	1 500 m	2 000 m
Trottoir roulant (TRAX)	2'30"	5'	7'30"	10'
Trottoir roulant (+ marche)	2'	4'	6'	8'
Navette (10 m/s)	1'50"	3'10"	4'20"	5'30"
Navette (20 m/s)	1'35"	2'15"	2'55"	3'35"
Semi-continu	1'25"	2'15"	3'05"	3'55"

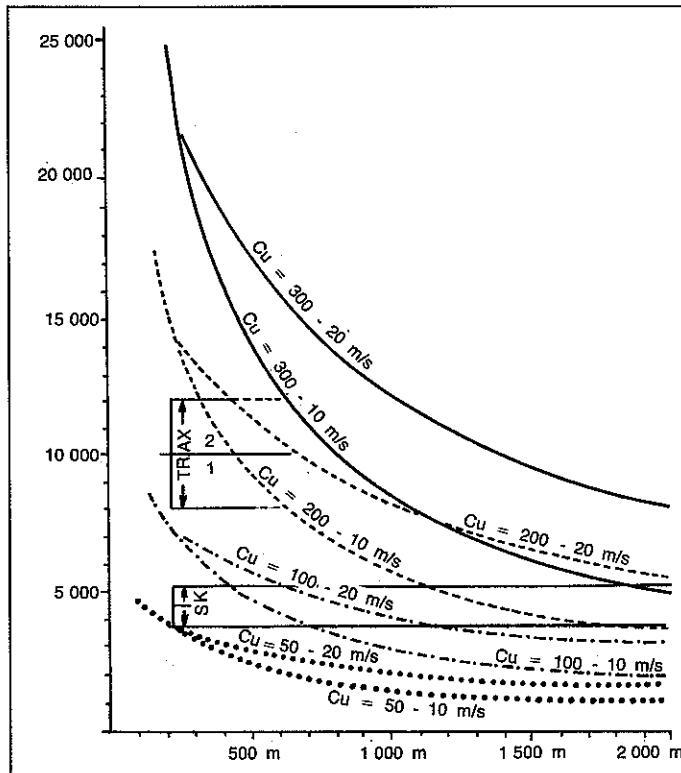


Figure 2: Capacité horaire selon capacité unitaire

Les principaux résultats sont les suivants:

- les trottoirs roulants accélérés sont compétitifs dans un domaine restreint aux très courtes distances, particulièrement aux heures de pointe lorsqu'il n'est guère possible de marcher sur le trottoir;
- les navettes à 10 m/s surclassent les trottoirs roulants accélérés dès 300 à 400 mètres;
- les semi continus ont des temps d'entrée-sortie meilleurs que les trottoirs roulants accélérés dès 200 mètres. Ils surclassent toutes les navettes dans la plage de distances de 0 à 700-800 mètres. Ils font jeu égal avec les navettes les plus rapides (20 m/s) de 700-800 mètres à 2 000 mètres, avec toutefois un léger avantage pour les navettes lorsqu'on approche cette borne supérieure.

#### La capacité

La figure 2 compare les capacités des divers systèmes.

Les trottoirs roulants accélérés offrent des caractéristiques

de capacité intéressantes. Un trottoir type TRAX a une capacité maximum de 8 000 à 10 000 passagers par heure. Il faut toutefois remarquer que cette capacité est figée et non modifiable d'un site à l'autre.

Les funiculaires horizontaux (ou navettes à deux véhicules) ont une capacité (en passagers par heure) caractérisée par la formule suivante:

$$\text{Capacité horaire} = \frac{3600 \times \text{capacité unitaire}}{a + (b \times \text{distance})}$$

où a et b sont des constantes dépendant de la configuration et de la cinématique des véhicules.

La figure 2 montre les graphes de quelques-unes de ces fonctions hyperboliques, pour des capacités unitaires de 50 à 300 places. On voit que les navettes offrent des débits importants pour les courtes distances mais doivent faire appel à de très gros véhicules pour conserver des capacités intéressantes sur de longues distances. Cela peut constituer un inconvénient du point de vue du coût et des problèmes d'insertion.

Les systèmes semi continus sont actuellement caractérisés par la petite taille de leurs véhicules. La raison en est complexe. Dans le but de conserver un maximum de simplicité, on a généralement recours à des véhicules à une seule porte. Compte tenu du temps très court passé en station et de la vitesse résiduelle compliquant les opérations d'embarquement et débarquement, les promoteurs ont été conduits à adopter des capacités unitaires très réduites, de 8 à 20 passagers selon le taux de places assises retenu.

Pour une fréquence indicative de 20 secondes, la capacité du système est donnée par la formule:

$$\text{Capacité} = \frac{3600}{20} \times C = 180 \times C$$

où C est la capacité unitaire

On voit que la capacité de ces systèmes se situe normalement entre 1 500 et 4 000 passagers par heure. Nous sommes parvenus à la conclusion théorique que des véhicules plus gros, à deux portes, accueillant une trentaine de personnes en majorité debout, pourraient, sur de courtes distances, offrir une capacité de 5 000 passagers par heure.

Bien que limités en termes de capacité, les systèmes semi continus présentent l'avantage incontestable de l'indépendance de la capacité à la distance, dans la mesure où le nombre de véhicules en service n'est pas limité. Les systèmes semi continus sont ainsi particulièrement compétitifs en termes de capacité dès que la distance interstations dépasse plusieurs centaines de mètres.

## Les coûts

Comme indiqué précédemment, la question des coûts reste particulièrement floue et nous nous bornerons ici à donner quelques appréciations qualitatives.

Les trottoirs roulants accélérés de type TRAX sont certainement coûteux tant en investissement qu'en exploitation. Les coûts d'installation sont élevés du fait de la complexité mécanique et de la précision requise dans la réalisation des infrastructures. De plus, les coûts d'exploitation sont vraisemblablement élevés du fait de la complexité mécanique qui a toutes chances d'induire des usures nécessitant de fréquents remplacements de pièces.

L'existence d'une main courante synchronisée avec le plancher est favorable pour le confort des usagers mais augmente cette complexité mécanique, donc les coûts d'investissement et d'exploitation.

En ce qui concerne la conception des infrastructures, l'encombrement réduit de ce système à forte capacité est un point positif; la quasi-absence de surcoûts de station, correspondant pour les autres systèmes aux zones d'attente, est également favorable. A l'opposé, un aspect négatif du système est la faculté très limitée à accepter des courbes tant en plan qu'en profil en long. Par ailleurs, l'installation de tels systèmes dans des sites exposés aux intempéries ne pourrait sans doute pas se faire sans une couverture.

Les navettes (y compris les funiculaires horizontaux) présentent le double avantage d'une grande simplicité mécanique et de la possibilité d'exploitation en voie unique. La passivité des véhicules constitue également un avantage, surtout si on peut se passer de les chauffer et de les éclairer. Mais les véhicules de ces systèmes doivent avoir de très grandes dimensions si

on doit faire face à de fortes capacités sur de longues distances: cela risque d'induire des surcoûts importants dus aux surdimensionnements des stations et des superstructures.

**Les systèmes semi-continus**, du moins les plus rustiques d'entre eux, sont les mieux à même de permettre les coûts les plus bas. La quasi-absence d'attente à l'embarquement autorise la conception de stations très compactes, ainsi que l'a montré le SK.

Ils nécessitent le recours à la voie double, mais les faibles masses supportées permettent d'avoir des superstructures très légères. La conception mécanique et les dispositifs de sécurité sont caractérisés par leur simplicité, simplicité qui devrait être con-

servée, même si ces systèmes sont appelés à évoluer vers plus de robustesse afin de s'adapter aux rigueurs de l'environnement urbain.

Les systèmes semi-continus les plus simples (du type SK) peuvent prendre les courbes et les pentes que l'on rencontre sur la plupart des sites. Des systèmes plus complexes, comme le DELTA V, ont des capacités d'insertion exceptionnelles avec des courbes de quelques mètres de rayon et des pentes supérieures à 70%, mais ceci se paye en investissement et en exploitation (bien qu'actuellement les coûts ne soient pas encore connus avec précision puisque seul un prototype a été construit).

## Les opportunités de développement

Dans le passé, la quasi-absence de marché pour les transports hectométriques a été liée à l'existence d'autres priorités. Il est à prévoir que les transports à courte distance ne constitueront jamais une nécessité fonctionnelle, dans la mesure où la marche pour les sites les plus courts et les moyens de transport motorisés traditionnels pour les sites les plus importants au sein du domaine hectométrique (0 à 2 000 m) resteront une alternative possible. Mais nous pensons que les opportunités de développement devraient se multiplier pour plusieurs raisons.

### *Polarisation de certaines activités dans des sites conçus pour l'automobile et/ou les transports collectifs lourds*

Ce contexte est favorable dans la mesure où il regroupe des grands parkings, des espaces ouverts à la circulation et des immeubles de grande hauteur qui doivent être reliés entre eux en dépit de distances incompatibles avec la marche.

Les aéroports entrent dans cette catégorie, avec des caractéristiques particulières (terminaux multiples) renforçant la demande de transport à courte distance.

### *Développement de grands centres de loisir*

Dans de tels centres, à la fois pour des raisons d'efficacité et de prestige, les systèmes automatiques sont plus valorisés que les moyens traditionnels tels que les bus ou les tramways — sauf quand un style historique est recherché.

Des systèmes constitués de plusieurs liaisons point à point, s'ils sont bien organisés, pourraient souvent offrir une meilleure qualité de service que des systèmes en boucle.

### *Développement des structures aériennes légères, facteur de réduction des coûts*

Le plus souvent refusées dans les centres historiques des villes européennes au profit de coûteuses infrastructures souterraines, les structures aériennes légères devraient progressivement être mieux acceptées en milieu suburbain, notamment si les niveaux de bruit et de pollution sont négligeables. Des stations de dimensions très réduites sont un avantage déterminant des systèmes continus et semi continus dans un tel environnement.

### *Dérégulation des transports urbains*

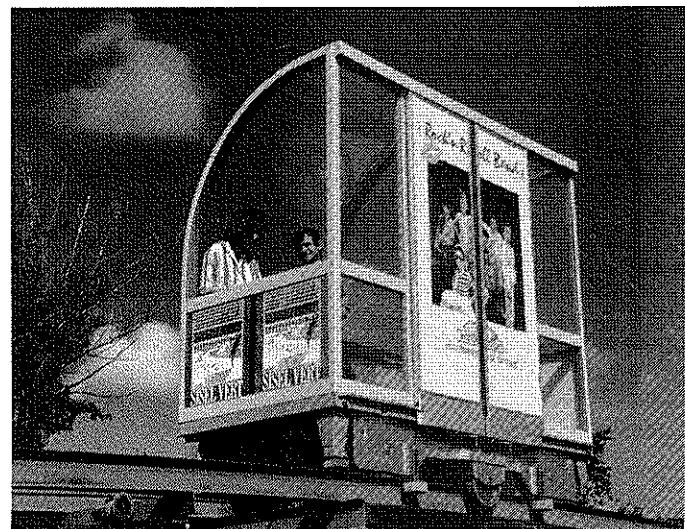
Une conséquence possible de la dérégulation (ou de la privatisation des transports publics) peut être de promouvoir des projets locaux, notamment quand les mécanismes de récupération de la plus-value foncière pourront contribuer au financement de systèmes automatiques guidés. Toutefois, l'expérience

montre que les coûts unitaires s'accroissent lorsque la longueur des systèmes augmente. Il est probable que les développeurs privés essaieront de tirer le plein avantage des systèmes de transport public lourds, en y raccordant des lignes de rabattement pour lesquelles les systèmes que nous avons examinés peuvent être bien adaptés.

Il est de plus possible que la réalisation de projets de taille réduite mais performants devienne de plus en plus attractive localement, à partir du moment où la privatisation va probablement contribuer à lier les intérêts publics et privés au niveau de la ville ou de l'agglomération.

### *Perspectives de réduction des coûts*

Il est probable que les systèmes de transport à courte distance permettront d'obtenir des coûts d'investissement et de fonctionnement réduits. Les problèmes de sécurité sont plus simples à résoudre du fait de la localisation du contrôle et de la limitation des vitesses. La possibilité d'extraire les véhicules pour la maintenance est également un aspect favorable de certains de ces systèmes. Enfin, dans le cas où des infrastructures particulières seraient nécessaires (viaduc, tranchée, voie, souterrain), leur section pourra être très réduite.



Le SK sur le site de Villepinte.

# Sur la réglementation de la sécurité des transports nouveaux par objectifs quantifiés

Henri Bertrand THIBAULT

Direction des Transports Terrestres

Jean-François DHALLUIN

Chargé de recherche INRETS-CRESTA

**Les systèmes de transport urbains sans conducteur connaissent un développement très important lié en particulier au succès remporté par le système VAL installé à Lille. Les nouvelles générations de matériels pour les systèmes à venir (horizon 1990) subiront sans doute de profondes modifications, dans les principes de pilotage, mais aussi dans les solutions technologiques apportées pour traiter ces fonctions et notamment pour ce qui a trait à la sécurité.**

Ces évolutions ont pour but de rendre les systèmes plus souples, mais en corollaire, de fonctionnement plus complexe et technologiquement plus sophistiqués. Economiquement la flexibilité est souhaitable à plusieurs points de vue; pour une meilleure adaptation à un tissu urbain, pour un assouplissement des modes d'exploitation par absorption des pointes ou par des services provisoires bien adaptés, et enfin elle se prête également à l'évolution d'un réseau.

L'objet de cet article est de présenter quelques réflexions sur le problème de l'accroissement de la complexité et en conséquence sur l'approche nouvelle nécessaire à l'étude de sécurité de ces nouveaux systèmes. La sophistication des équipements écarte par nature l'approche intrinsèque de la sécurité pour lui substituer une approche probabiliste. Du point de vue de l'Autorité Administrative (DTT) on examine en particulier un type de réglementation de la sécurité par objectifs quantifiés favorisant la prise en considération d'une sécurité probabiliste.

## Actualisation de la réglementation de la sécurité par objectifs quantifiés

Les travaux de la commission Chauchoy (réf. 1) et notamment le groupe de travail Sécurité animé par la RATP proposait dès 1976 une réglementation de la sécurité par objectifs quantifiés. Celle-ci avait été formulée au moment où les projets VAL, ARAMIS et POMA étaient en phase de prédéveloppement. Aujourd'hui seul le système VAL a eu son développement mené à terme or, en raison du concept de sécurité positive retenu pour les dispositifs de sécurité et malgré la proposition du constructeur de définir des allocations de sécurité aux différents sous-systèmes, le dimensionnement des équipements vis-à-vis de la sécurité puis l'agrément des automatismes n'eut pas réellement besoin de la réglementation par objectifs quantifiés (1). Aujourd'hui outre le projet SACEM, les systèmes ARAMIS et POMA voient le jour après un renouveau technologique notamment celui des microprocesseurs, leur agrément vis-à-vis de l'Autorité Administrative pose à nouveau le problème d'un consensus sur une approche quantifiée de la sécurité.

La démarche suivie jusqu'alors pour la conception des équipements de sécurité consiste à réaliser des fonctions logiques élémentaires en sécurité intrinsèque puis à les assembler de façon à constituer une fonction définie dans les spécifications fonctionnelles des automatismes. On parvient ainsi à concevoir des fonctions logiques combinatoires ou séquentielles sécuritaires dont le but est de maintenir les véhicules de transport

à l'intérieur d'un domaine de fonctionnement sécuritaire. Elles permettent également d'assurer la protection des échanges de voyageurs en station. Si dans les nouvelles générations la philosophie de ces dispositifs reste la même, la flexibilité impose d'utiliser des valeurs numériques correspondant aux grandeurs cinématiques des véhicules; position, vitesse, et à des repères topographiques de la ligne telle la position des stations par exemple. Les valeurs numériques des variables et les algorithmes de traitement sécuritaires sont gérés par des systèmes microinformatiques spécialisés, dont il convient d'assurer également leur propre sécurité de fonctionnement (protection contre leurs défaillances et contre les parasites électromagnétiques d'environnement).

La complexité se situe à plusieurs niveaux; dans la structure même des unités de traitement à microprocesseur, dans le logi-

(1) Les principes retenus furent les suivants:

1. les modes de pannes des composants sont connus de façon exhaustive,
  2. une panne simple (ou plusieurs pannes ayant une origine commune) ne peut provoquer un accident,
  3. si une panne simple est sans effet immédiat, elle doit être combinée à toutes les autres pannes, toutes les combinaisons doivent infliger immédiatement au dispositif un comportement sécuritaire (réf. 2-3).
- Devant l'impossibilité technologique d'appliquer le troisième principe pour certaines fonctions particulières, l'allocation fut utilisée pour calculer des intervalles de maintenances périodiques de sécurité.

ciel d'application correspondant aux algorithmes sécuritaires et dans la définition même de ces algorithmes (dimensionnement, et spécification).

Par ailleurs les familles de circuits microinformatiques évoluent rapidement et les fonctions à réaliser se diversifient avec le nombre de projets à l'étude. Cette dynamique est telle qu'une approche basée exclusivement sur l'expérience antérieure et sur les investigations technologiques utilisée en sécurité intrinsèque ne suffit plus.

Face à cette complexité la notion de sécurité probabiliste est proposée. La démarche consiste à déterminer par analyse les scénarios dangereux engendrés par des défaillances non détectables puis à calculer leur probabilité d'occurrence à partir de modèles statistiques de distribution d'erreurs. Les équipements sont évidemment conçus de telle façon qu'une majorité de fautes soient détectées ceci par des procédés de détection d'erreurs ou par l'emploi de redondances (2). L'étude de sécurité d'un dispositif consiste alors à évaluer un majorant de la proportion des fautes non détectables contraires à la sécurité.

Les évaluations probabilistes s'appuient sur la théorie des probabilités, sur des méthodes d'analyse de modélisation et de calcul, et aujourd'hui sur des outils informatiques permettant d'effectuer des calculs de probabilité. Deux aspects de la fiabilité sont à mettre en évidence:

— les essais de fiabilité permettant de déduire avec un intervalle de confiance fixé les données de fiabilité; lois de distribution d'erreur et valeurs numériques des paramètres de ces lois;

— les études de fiabilité prévisionnelle s'appuyant sur les données et les méthodes évoquées ci-dessus.

L'expérience est acquise par les essais de fiabilité sur l'utilisation des composants dans des conditions particulières (essais accélérés à haute température) ou par un nombre élevé d'utilisateurs dans des conditions différentes et dans des domaines d'application très divers.

A la différence des études de fiabilité classiques où l'on s'intéresse aux valeurs de probabilité des états défaillants et non défaillants, l'étude (probabiliste) de la sécurité d'un système se fixe comme but d'identifier les événements dangereux et d'établir la relation de cause à effet (défaillance-accident) puis de calculer la probabilité d'occurrence de ces événements.

La plupart des secteurs d'activité à haut risque utilisent des approches probabilistes de la sécurité, que ce soit pour les phases d'exploitation d'un équipement telle la sécurité incendie dans les établissements recevant du public, ou pour la protection d'un site expérimental dangereux; protection des personnels et de l'environnement (3).

Dès le début des années 1960 le secteur de l'aéronautique et plus particulièrement celui de l'aviation civile fut confronté à l'accroissement de la complexité des systèmes (avant l'avènement des microprocesseurs) et donc a entrepris une approche probabiliste des problèmes de risques, pour sa part le secteur de l'électronucléaire a commencé dès le début de son programme un effort de développement des analyses probabilistes de sécurité. On décrit un peu plus loin les dispositions réglementaires en vigueur dans ces domaines d'activité.

## Principe de la réglementation de la sécurité par objectifs quantifiés

Dans le domaine des transports ferroviaires et plus particulièrement celui des transports urbains en site propre, plusieurs types de réglementation sont envisageables:

— d'abord une réglementation basée sur les moyens à mettre en œuvre pour assurer la sécurité (choix des matériaux par exemple);  
— une réglementation basée sur des objectifs qualitatifs de sécurité s'appuyant sur un répertoire de manifestations indésirables (les accidents);  
— une réglementation basée sur des objectifs quantitatifs de sécurité.

Au moment de la publication du rapport de la commission Chauchoy, les deux premiers types de réglementation étaient en vigueur. Ils le sont toujours. Tous deux s'appuient largement sur l'expérience; sur un plan positif par le choix de matériaux et de techniques éprouvés, et sur un plan négatif par les enseignements acquis par les commissions d'enquête après accidents. Il est à noter que ces trois réglementations correspondent dans l'ordre à des degrés de liberté croissants pour le constructeur. Le troisième type favorisant plus particulièrement l'innovation.

La réglementation par objectifs quantifiés s'appuie elle aussi sur l'expérience mais sur l'aspect statistique des accidents, l'Autorité Administrative se référant à l'exploitation d'autres systèmes reconnus comme sûrs par elle-même et par l'opinion publique.

Le principe de cette réglementation consiste donc à formuler, à partir de statistiques d'accidents, des objectifs chiffrés sous forme de taux d'accidents alloués à priori au nouveau système en projet. L'Autorité exige de celui-ci un niveau de sécurité au moins analogue à celui des systèmes de référence. La longue expérience d'exploitation de la RATP, et la bonne image de sécurité de son réseau permet de fournir des indications significatives et valides au sens statistique (réf. 6).

Les statistiques sont analysées et les accidents classés par type (en fonction des causes) et selon leur gravité. Globalement deux indicateurs sont exprimés, ils correspondent respectivement au fonctionnement du système de transport lui-même (automatismes, caisses...) où le voyageur est passif, et à une allocation relative à la constitution du système (son ergonomie) où le comportement du voyageur est à prendre en compte; aux quais de station par exemple (cf. encadré, réf. 7-12).

A partir de ce point de vue, celui de l'usager, le constructeur propose une répartition de l'allocation globale sur les différents équipements et convertit le taux d'accident en taux horaire moyen de défaillance contraire à la sécurité. Cette grandeur physique est homogène avec le taux de défaillance classique utilisé en fiabilité. La transformation peut s'effectuer de façon arbitraire mais en tenant compte également du fonctionnement du système et de sa constitution telle qu'elle est envisagée; taille des véhicules, nombre de stations, architecture des automatismes... C'est au niveau de cette transformation que le constructeur dispose d'une certaine latitude de choix pour répartir les efforts à fournir pour conférer le bon niveau de sécurité à son système (figure 1).

(2) Parmi les procédés on peut citer la mise en œuvre des codages pour la protection de l'information (processeur codé issu du projet SACEM). Les redondances permettent par comparaison de détecter les dysfonctionnements d'un dispositif. L'imbrication de redondances et de procédés de détection d'erreur est également employée (réf. 15).

(3) La Direction de la Défense et de la Sécurité Civile (DDSC) du ministère de l'Intérieur engage une réflexion vers la définition d'objectifs probabilistes de sécurité incendie des établissements recevant du public (réf. 4). A titre indicatif, sur le site d'essai du moteur Vulcain d'Ariane 5 la Société Européenne de Propulsion s'est fixée un objectif d'accident mortel de  $5 \cdot 10^{-5}$ /an. A l'aide de protections particulières dimensionnées en fonction de cet objectif, la probabilité de destruction du banc d'essai est fixée à  $10^{-3}$ /an, chiffre comparable à une activité pyrotechnique du type fabrication d'explosifs.

## Part de responsabilité du système de transport

On distingue ainsi trois classes d'accidents concernant les voyageurs:

- Accidents Système: les voyageurs *passifs* subissent des accidents imputables à des défaillances ou à un mauvais entretien du système de transport, à des fautes d'exploitation, à un environnement anormal.
- Accidents Voyageur-Système: le voyageur est *actif*, le système provoque un accident du fait de cette action du voyageur.
- Accidents Voyageur: le système n'est que le cadre du

déroulement de l'accident.

- On comptabilise aussi les malaises des voyageurs à bord des voitures.

### Résultats observés sur le réseau urbain de la RATP

Il est ainsi possible de définir une grille, schématisée ci-dessous, qui peut être remplie en «nombre de blessés/10<sup>9</sup> voyageur ou en «nombre de blessés graves/10<sup>9</sup> voyageurs».

L'application de cette grille au Métro de Paris donne pour la période 1960-1974.

#### a) en «blessés»/10<sup>9</sup> voyageurs

Cause Caractère	«Système»	«Voyageurs-Système»	«Voyageurs»	Malaises	
	Effectivement collectif	14,5	0,8	535	587
Individuels	61,7	2191			

#### b) en «blessés graves»/10<sup>9</sup> voyageurs

Cause Caractère	«Système»	«Voyageurs-Système»	«Voyageurs»	Malaises	
	Effectivement collectif	0,2	0	4	27
Individuels	0,7	18,9			

Cette grille permet de dégager deux indicateurs de sécurité concernant les accidents collectifs occasionnés par le système (pilotage et protection des rames en inter-station)

A: 14,5 blessés pour 10<sup>9</sup> voyageurs transportés

B: 0,2 blessés graves ou tués pour 10<sup>9</sup> voyageurs transportés.

L'objet de la démonstration de sécurité, à soumettre à l' Autorité, consiste d'une part à justifier la répartition de l'objectif global sur les différents sous-systèmes, à déterminer les risques encou

rus par la défaillance de ces sous-systèmes puis à comparer point par point la valeur chiffrée de l'objectif à celle calculée dans l'étude prévisionnelle de sécurité.

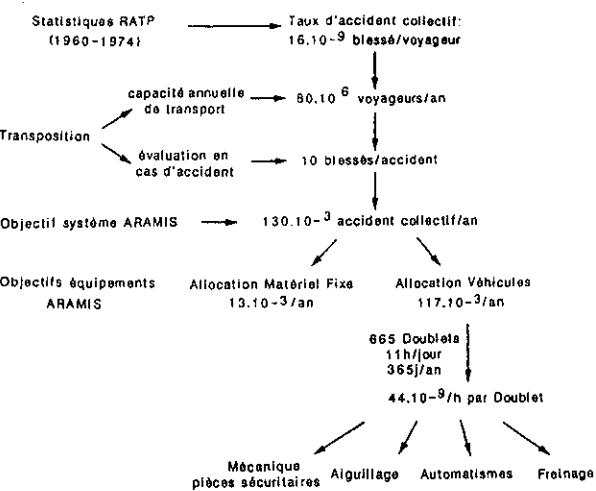
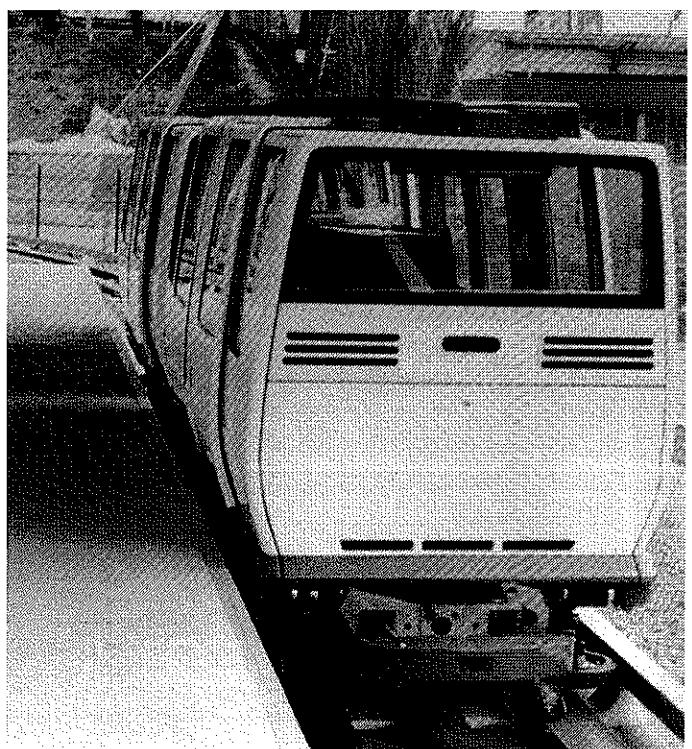


Figure 1: Schématisation de la démarche proposée pour Aramis Cas de l'application à la petite ceinture Sud de Paris



Le système Aramis sur son site d'essais

# Analogie avec les secteurs de l'aviation civile et de l'électronucléaire

Sur le plan réglementaire l'organisation des études de sécurité sur la base d'objectifs quantifiés est admise dans ces deux secteurs d'activité industrielle. L'analogie n'a ici pour but que d'offrir au lecteur quelques points de repère, les comparaisons sont effectuées sur l'aspect réglementaire et sur les ordres de grandeur de niveau de sécurité des équipements.

## Aviation civile

Dans l'histoire de l'aviation civile l'expérience montre que le taux d'accident ramené à l'heure de vol ne cesse de décroître. Les progrès en matière de sécurité sont le fruit d'efforts permanents concertés et cohérents effectués par l'ensemble de la communauté internationale qui dans ce domaine a pris très tôt l'habitude de la coopération approfondie. Ceci s'explique de par la nature même de ce moyen de transport à vocation internationale (4).

Sur le plan réglementaire on retrouve globalement les différents types énoncés précédemment pour les transports ferroviaires à savoir: à l'origine une approche pragmatique liée à l'expérience, où l'on recherche à éliminer pour le futur les causes qui ont été à l'origine des accidents, puis ensuite une approche dite rationnelle sur la base d'évaluations probabilistes introduites du fait de l'accroissement de la complexité des appareils.

L'expérience accumulée au fil des années est consignée dans des règles de navigabilité ou réglementation technique (CAR 04 B puis FAR 25 aux Etats-Unis et JAR 25 en Europe).

Lors de la mise en service d'un appareil de série plusieurs parties ont leur responsabilité; les Autorités de l'Aviation Civile, les compagnies aériennes et les constructeurs. En ce qui concerne les phases de conception et de développement, les Autorités imposent des normes de sécurité couvrant la conception, les matériaux, la construction et les performances. Le constructeur soumet aux Autorités les données de conception et de performance démontrant que la série d'appareils est conforme aux normes de sécurité, ce qui aboutit à la délivrance d'un certificat de navigabilité. Par ailleurs la condition technique imposée aux systèmes conduit le constructeur à identifier toutes les pannes susceptibles de se produire et de démontrer qu'elles sont acceptables en confrontant pour chacune d'elles son niveau de gravité et une valeur prévisionnelle de probabilité d'occurrence.

Ainsi est fixée la condition que toute panne globale catastro-

(4) Une structuration internationale de l'agrément a été mise en place notamment par un effort de normalisation des procédures et des objectifs, ceci de façon à parvenir à une confiance mutuelle sur le niveau de sécurité existant entre les différents pays (réf. 8-9).

Dans le même esprit, au niveau national il va de soi que les objectifs alloués et les niveaux de sécurité des différents systèmes doivent être homogènes.

Tableau 1: Classes de probabilité d'événements

		Objectif de sécurité		
Mineure				
Légère dégradation des caractéristiques ou un faible accroissement de la charge de travail de l'équipage.		← Frontière réglementaire		
Majeure				
Dégradation notable de marge de sécurité.				
Augmentation sensible de charge de travail de l'équipage.				
Critique			A (*)	
Dangereuse dégradation des marges de sécurité.				
Dangereux accroissement des charges de travail équipage.				
Conditions marginales pour les occupants.		Aucune panne ne doit conduire à une combinaison probabilité/conséquence dans cette zone.		
Catastrophique				B (*)
Perte de l'avion et/ou accidents mortels.				
Prob. par heure de vol.		$10^{-5}$	$10^{-7}$	$10^{-9}$
Classe de conséquences	Probable	Rare	Extrêmement rare	Extrêmement improb.
Classe de probabilités	Peut arriver de temps en temps pendant la vie opérationnelle de chaque avion.	N'arrive pas à chaque avion, mais peut se produire plusieurs fois dans la vie d'une flotte.	N'arrive pas dans la vie d'une flotte en général, mais considéré comme possible.	Un tel événement n'arrivera pas.

(\*) à seule fin de préciser l'analogie, les classes d'événements libellées par les indicateurs A et B de l'encadré peuvent se ranger comme l'indique le tableau ci-dessus.

phique soit extrêmement improbable ( $< 10^{-9}/h$ ), et que toute panne critique soit extrêmement rare ( $< 10^{-7}/h$ ) (cf. tableau 1) (5). Il a été admis pour l'Airbus A 300 que la probabilité de chaque panne globale catastrophique était inférieure à cet objectif. Ceci a pu être fait en considérant certaines hypothèses sur:

- les taux de pannes (données de fiabilité),
- les intervalles d'inspection ou maintenances préventives,
- les durées moyennes de vol.

On notera au passage qu'un tiers des accidents seulement sont dus à l'avion lui-même (réf. 9). Dans ce domaine la gravité d'une situation est liée à l'effet instantané de la défaillance précédant l'action de l'équipage; une défaillance critique ou majeure peut laisser la possibilité d'un atterrissage au plus tôt ou forcé, une défaillance catastrophique comme une explosion ne laisse aucune latitude d'action à l'équipage. Cette notion n'existe pas dans les systèmes de transport urbains automatisés essentiellement par le fait de l'absence de conducteur (6). Les automatismes de pilotage assurent seuls la sécurité de la marche des trains, et ce de façon binaire: autorisation ou inhibition de rouler, toute erreur de pilotage se traduisant par une situation dangereuse (6).

## Electronucléaire

Dans le domaine de l'électronucléaire où les risques encourus par l'environnement sont considérables comme on le sait, les Autorités de Sûreté ont fixé une probabilité totale de séquence

accidentelle conduisant à la fusion du réacteur à  $10^{-7}/\text{an}$  par réacteur (soit environ  $10^{-11}/h$ ).

Dès le début de la mise en œuvre de son programme électronucléaire, EDF a entrepris un effort important de développement des analyses probabilistes appliquées à la fiabilité des systèmes de sécurité, et ceci dans un cadre de recherche en dehors de tout aspect de réglementation (réf. 10). L'ensemble des études a permis de définir une démarche d'analyse qui après application à plusieurs systèmes de sécurité a conduit à trouver sa maturité. Les valeurs de probabilité ainsi calculées furent jugées satisfaisantes par les Autorités de sûreté.

Pour effectuer une évaluation probabiliste du risque quatre niveaux d'étude sont définis:

- l'évaluation de la probabilité de fusion du cœur du réacteur,
- l'évaluation probabiliste des relâchements de produits radioactifs,
- l'évaluation des risques encourus par l'environnement et le public,
- la prise en compte des agressions internes (inondations, incendie) et externes (chutes d'avions, séismes).

Une étude incluant les deux premiers niveaux est appelée étude probabiliste de sûreté. Pour la centrale de Paluel l'étude probabiliste de sûreté en cours (1986-1988) porte sur le premier niveau, un effort de 40 ingénieurs/an est attribué à cette étude jusqu'en 1988. On notera que sur le plan de l'exploitation EDF possède aujourd'hui une expérience de 200 années réacteurs. Sur le plan international une trentaine d'études probabilistes de risque et de sûreté ont été effectuées jusqu'alors.

## Discussion sur ce type de réglementation

Une approche de la sécurité par objectifs quantifiés offre à l'Autorité la possibilité d'exprimer son souci de sûreté de façon claire et synthétique sans pêcher par exigence puisqu'elle se réfère à l'expérience d'un ou de plusieurs modèles existants. Elle ne nie pas les réglementations traditionnelles toujours applicables dans certaines situations, par exemple le choix des matériaux vis-à-vis des risques d'incendie. Il est de fait que l'approche quantifiée n'apporte pas une solution globale dans la mesure où il n'existe pas de méthodes d'évaluation prévisionnelle dans tous les domaines concernés par la sécurité d'un système de transport urbain. Ceci faute de données statistiques, notamment lorsque le comportement des usagers est à prendre en considération dans une situation dangereuse.

Toutefois en ce qui concerne le système en lui-même; la voie, les véhicules, les automatismes de pilotage, c'est-à-dire là où se matérialise l'innovation, l'approche quantifiée apporte une solution rationnelle face à l'accroissement de la complexité des équipements. L'ensemble de la réglementation doit certes tenir compte des évolutions en cours, pourtant en aucun cas on ne saurait aboutir à un niveau de sécurité inférieur à celui obtenu par l'application des deux premiers types actuellement en vigueur.

Lors de la mise en service d'un système nouveau, l'Autorité peut effectuer un premier jugement objectif sur la base des évaluations prévisionnelles, puis par la suite donner son agrément après une phase d'exploitation de durée suffisante. En ce qui concerne les procédures d'agrément des systèmes en service

actuellement nous renvoyons le lecteur à l'article de M. Le Trung (réf. 11).

Ce mode de réglementation sous entend la remise à jour permanente des données statistiques et l'adjonction des résultats des systèmes récemment mis en service. Les accidents jugés inadmissibles par les commissions d'enquête sont peut-être à éliminer des statistiques en vertu du second type de réglementation. La référence au réseau RATP utilise aujourd'hui des statistiques fournies pour la période de 1960 à 1974 or le matériel a considérablement évolué depuis (7). Enfin l'emploi des résultats ne peut s'envisager que si les données ont été traitées avec rigueur au niveau de la saisie (exhaustivité), et de l'interprétation.

Nous avons montré plus haut, lors de l'exposé des principes, que l'on pouvait depuis l'allocation globale, répartir les taux de défaillance horaire contraires à la sécurité sur les divers équipements. On note à ce sujet qu'il existe entre les différents systèmes à l'étude une certaine dispersion dans les valeurs numériques. Les taux de défaillance se situent en effet dans une fourchette allant de  $10^{-8}/h$  à  $10^{-12}/h$ . Il est vrai qu'un système à faible débit et dont les véhicules transportent peu de voyageurs est en cas de collision moins meurtrier qu'une collision entre deux rames du RER en heure de pointe. Toutefois d'un point de vue déontologique, l'Autorité ne peut accepter ni un niveau de sécurité insuffisant, les voyageurs seraient délibérément en danger, ni trop sévère car difficilement démontrable par un calcul prévisionnel.

(5) Les résultats statistiques de l'aéronautique montrent qu'il se produit en moyenne un accident catastrophique par million d'heures de vol. De cette constatation et à partir d'une analyse des risques pour un appareil les objectifs chiffrés sont ceux que nous avons mentionnés.

(6) Une panne peut être dangereuse de plusieurs manières: pour la classer il faut tenir compte de son effet instantané qui précède toute réaction de l'équipage, de son effet immédiat contre lequel l'équipage dispose d'un temps très court pour

intervenir, de ses effets à moyen et à long termes. Le danger résultant des pannes est aussi envisagé en regard des conditions extérieures et des phases de vol (réf. 9).

(7) Depuis 1974 le matériel roulant a été en grande partie renouvelé et le pilotage automatique a été généralisé sur la quasi-totalité du réseau urbain (réf. 12). On peut remarquer à titre anecdotique que durant la période considérée (1960-1974) la circulation des rames en interstation s'effectuait porte fermée mais déverrouillable par les usagers!

L'évaluation probabiliste de la sécurité d'un équipement s'effectue selon une approche homogène avec celle des autres paramètres de sa sûreté de fonctionnement. La sûreté de fonctionnement d'un système étant définie d'une façon plus générale comme la qualité de service qu'il délivre de sorte que les utilisateurs puissent lui accorder une confiance justifiée (réf. 13). Parmi ces paramètres on trouve les notions de fiabilité, de disponibilité de maintenabilité et de sécurité. Les données de base et les méthodes de modélisation et de calcul sont globalement identiques, le constructeur trouvera avantage en harmonisant ses études, et en cherchant sur le plan économique à optimiser le compromis sécurité disponibilité.

Dans le cadre de sa mission de suivi des nouveaux systèmes automatisés, de l'examen critique des études de sécurité et de sa participation aux différentes commission de sécurité mises

en place par la DTT, l'INRETS participe au processus de validation. A ce titre un travail d'évaluation est effectué tant en ce qui concerne les principes nouveaux que leurs techniques de mise en œuvre. Ce travail organisé en collaboration avec les constructeurs touche aux aspects systèmes (automatismes) et en ce qui concerne l'emploi des microprocesseurs aux aspects matériels et logiciels. A ce sujet l'INRETS met en place un outil informatique spécialisé dont le but est de participer à la validation des tâches gérées par les automatismes, par modélisation fonctionnelle et simulation, puis à valider les logiciels développés chez les constructeurs par génération de tests (réf. 14). Ce travail réalisé dans un cadre indépendant de celui du constructeur doit assurer une bonne couverture aux fautes de conception des systèmes, il doit permettre également aux équipes de vérification d'obtenir la conviction que les logiciels développés sont conformes aux fonctions requises.

## Conclusion

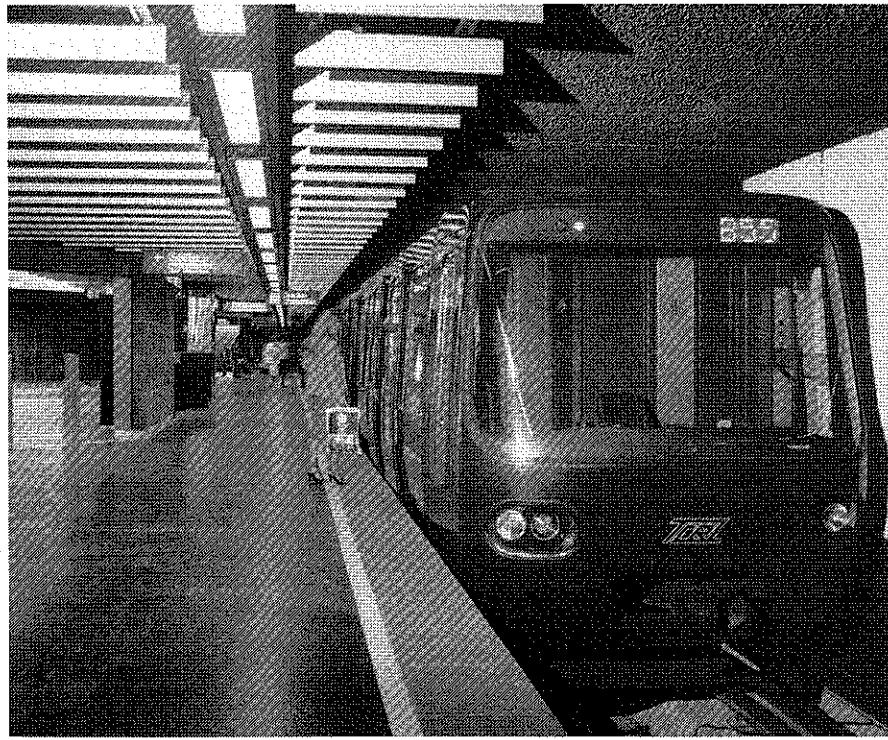
Poussés par la compétition internationale les développements industriels sont soumis à l'évolution rapide de la technologie et à la tendance vers une complexité croissante des équipements. Les systèmes de transport urbains automatisés n'échappent pas à cette tendance. Les impératifs de calendrier dus à la mise en service de nouveaux systèmes; le projet SACEM sur la ligne A du RER, le POMA de Laon, la ligne D du métro de Lyon et peut-être les futures lignes du VAL, soumettent l'Autorité Administrative à prendre en compte les évolutions en cours pour qu'elle parvienne à donner son agrément sur ces nouveaux systèmes selon la loi en vigueur (8). Elle favorise la synergie tant au niveau des études de sécurité, par l'intermédiaire des commissions de sécurité spécialisées, que sur le plan des développements technologiques sous forme de financements.

Cet article tente d'exposer l'état des réflexions des différents intervenants de la sécurité; maîtres d'œuvres, constructeurs, exploitants, Administration. Ces points de vue doivent être examinés par l'Autorité Administrative afin d'arrêter une position officielle et commune aux différents modes et systèmes de transport urbains prochainement mis en service.

(8) Article 31 bis du 22.10.1979 du Décret n° 730 de 1942.  
Par dérogation aux dispositions des articles 30 et 31, le ministre chargé des Transports peut, pour les transports publics d'intérêt local guidés le long de leur parcours en site propre, autoriser la mise en service de trains ne comportant aucun agent de conduite ou d'accompagnement lorsque la conduite de ces trains est entièrement automatique; cette autorisation est délivrée après agrément par le ministre chargé des Transports des types des équipements automatiques, des équipements de surveillance, et après approbation des règlements relatifs au service.

## RÉFÉRENCES

1. Proposition pour une nouvelle réglementation de systèmes de transport collectif terrestre de voyageurs. Conseil Général des Ponts et Chaussées, mars 1976.
2. Propositions en vue de la définition d'un cahier des charges de sécurité des modes nouveaux de transport (Gabillard R.). Rapport de contrat USTL, 1977.
3. Sur les rôles respectifs de l'homme et du matériel dans la sécurité d'un système de transport (Gabillard R., Ficheur M.). Annales des Ponts et Chaussées, 1979.
4. Approche probabiliste de la sécurité incendie dans les établissements recevant du public (Barbet J.F., Joubert D., Hognon B., Mathez J.). 4<sup>e</sup> Séminaire Européen sur la sécurité des systèmes, Deauville, 1986.
5. Etude des dangers du banc d'essai des turbopompes du moteur Vulcain destiné au futur lanceur européen Ariane 5 (Corteel G., Creignou O., Montalva H.). 4<sup>e</sup> Séminaire Européen sur la sécurité des systèmes, Deauville, 1986.
6. La sécurité dans les transports collectifs. Causes conséquences des accidents. Réglementation de la sécurité. Note résumée BCEOM, 1974.
7. Projet ARAMIS: Objectifs de sécurité basés sur une évaluation de la sécurité du métro de Paris. Rapport RATP du groupe de sécurité ARAMIS, 1975.
8. Les analyses de sécurité dans la certification: approche pragmatique, approche rationnelle (Quet A.). Revue Voies, n° 7 supplément, 1980.
9. La tolérance aux pannes et aux dommages: un concept appliqué à l'A 300 (Knospe D.). Revue Voies, n° 7 supplément, 1980.
10. Les études probabilistes de scénario d'accident (Villemeur A., Berger J.P.). 5<sup>e</sup> Colloque International de Fiabilité et de Maintenabilité, Biarritz, 1986.
11. Procédures d'agrément des automatismes des nouveaux systèmes de métro (Le Trung B.). Revue RTS de l'INRETS, n° 3, 1984.
12. Réflexions sur l'évaluation prévisionnelle de la sécurité des systèmes de transport nouveaux (Bied-Charreton D.). Rapport INRETS, CR/A 86-52.
13. Sûreté de fonctionnement des systèmes informatiques et tolérance aux fautes: concepts de base (Laprie J.C.). Revue TSI de l'AFCET 0752-4072/85/05, p. 419.
14. Méthode de modélisation de spécifications fonctionnelles par analyse structurée et automates (ASA). Document, Véritog, DV/AR/07/85/01.
15. Le poste d'aiguillage informatisé (Sevestre C.). Colloque AFCET Transport guidés, systèmes automatismes et communications, Paris, 3, 4, 5 février 1987.



# MAGGALY

## L'automatisation intégrale d'une ligne de métro sur un réseau existant

Rame de métro à la station Place Guichard (photo SEMALY-RUTTER)

Christian TEILLON

Société d'Economie Mixte  
du Métropolitain  
de l'Agglomération  
Lyonnaise — SEMALY —

Jacques PERNOT

Société Lyonnaise  
de Transports en Commun  
— TCL —

— Depuis quelques années, nous assistons à un développement de l'automatisation dans les transports ferroviaires. Quelques étapes clés montrent ce cheminement en France:

- 1951: premiers essais de pilotage automatique sur la navette «Porte des Lilas — Pré Saint Gervais».
- 1956: nouveaux essais de pilotage automatique sur la ligne n° 11.
- 1967: exploitation complète de la ligne n° 11 en pilotage automatique et adoption définitive en 1969 avec un seul agent à bord.
- 1978: mise en service de la ligne A du métro de Lyon, intégrant l'automatisation de nouvelles fonctions:
  - retournement des trains en terminus,
  - gestion centralisée des stations.
- 1983: mise en service du métro de Lille (VAL), entièrement automatique.

— Ce même développement est constaté partout dans le monde:

### • au stade de la réflexion

C'est ainsi que le Comité International des Métros de l'UITP, décida au début de l'année 1980, pour l'éclairer à ce sujet, de créer un groupe de travail «Automatisation intégrale de l'exploitation». Les travaux de ce groupe auxquels nous avons collaboré ont abouti à un rapport final en 1983, présenté officiellement lors du Congrès International de l'UITP à Rio de Janeiro.

Citons quelques extraits des résolutions qui concluaient ce rapport:

«L'automatisation intégrale de l'exploitation des métropolitains apparaît maintenant possible.

L'automatisation intégrale de l'exploitation des métros peut permettre d'améliorer simultanément, là où elle sera possible:

- la qualité du service offert au public,
- les coûts d'exploitation,
- les conditions de travail du personnel.

Les voies d'approche apparaissent très diversifiées et dépendent fortement des caractéristiques techniques et sociales des exploitations existantes.

L'automatisation intégrale de l'exploitation des métros est une technique d'exploitation, elle ne saurait constituer un objectif en elle-même dans le cadre du service public assuré par les métropolitains».

### • au stade d'études et d'expérimentation

Par exemple, les métros de Hambourg ou Berlin en Allemagne, Aramis en France, le TAU en Belgique...

### • au stade de la réalisation

- Kobé et Osaka au Japon,
- Vancouver au Canada,
- VAL à Lille,
- ...

Comment ce développement s'est-il réalisé au Métro de Lyon? C'est ce que nous allons essayer de montrer avec MAGGALY (Métro à grand gabarit de l'agglomération lyonnaise); en abordant successivement

- les principales étapes de la décision,
- l'intérêt du Maître d'Ouvrage,
- l'intérêt de l'exploitant,
- la conduite automatique intégrale,
- l'approche des problèmes de sécurité.

# MAGGALY: les principales étapes de la décision

L'avant-projet de la ligne D, établi en 1982, proposait pour la ligne D une reconduction des techniques ferroviaires adoptées pour les lignes A et B depuis 1978, à l'exception de deux évolutions:

- une refonte totale du poste de commande centralisée,
- une évolution technique du matériel roulant avec l'introduction de l'informatique embarquée.

Ceci permettait une mise en service progressive de la ligne grâce à sa compatibilité avec les lignes existantes.

Mais l'évolution générale de l'automatisation a conduit, dès 1984, SEMALY et TCL (société exploitante) à engager une réflexion sur les possibilités d'automatiser à terme le réseau. Un dossier était présenté à SYTRAL (autorité organisatrice) début 1985; ce dernier donnait un accord de principe en juillet 1985 pour une automatisation immédiate, car l'automatisation à terme nécessitait des délais accrus et un surinvestissement important.

Le 6 décembre 1985, était constitué un Groupement industriel avec les Sociétés ALSTHOM (chef de file), CSEE, Jeumont-Schneider et MATRA Transport. Le 11 décembre 1985, ce

Groupement remettait une proposition. Le 13 décembre 1985, le Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise (SYTRAL) décidait de mettre en œuvre sur la ligne D du métro de Lyon le système MAGGALY (Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise).

Fin 1985, l'intérêt de l'Etat était concrétisé par une subvention importante de celui-ci (25 millions de francs) aux dépenses de développement et d'expérimentation du système. La RATP et sa filiale SOFRETU, intéressées par l'acquisition du savoir-faire correspondant manifestaient également leur intérêt et acceptaient d'accorder une participation financière de 5 millions de francs. Le protocole d'accord RATP-SEMALY confirmant ces options a été signé le 25 mars 1986.

Cette décision s'est traduite par la signature, le 31 janvier 1986, d'une Convention Générale d'étude et réalisation du système entre la SEMALY (Société d'Economie Mixte du Métropolitain de l'Agglomération Lyonnaise) et le Groupement Industriel.

L'année 1986 a été consacrée à la mise au point du projet et les marchés ont été approuvés le 11 février 1987.

## MAGGALY: l'intérêt pour le Maître d'Ouvrage

Il convient de rappeler que les services publics, dont les transports publics urbains, posent depuis plusieurs années des problèmes de financement aux collectivités locales qui en assurent la charge.

Dans les réseaux qui sont en croissance, les investissements ont le plus souvent mobilisé la totalité de ressources des collectivités locales qui ont à faire face à d'autres besoins dont la priorité est passée au tout premier plan: politique sociale, sécurité...

Il était donc vital que la profession du transport recherche de nouvelles solutions «tous azimuts» permettant d'utiliser au mieux les ressources actuellement disponibles, voire de réduire la contribution des collectivités.

Cette nouvelle donne économique s'est déjà traduite par un changement au 1<sup>er</sup> janvier 1987 des relations contractuelles entre l'Autorité Organisatrice lyonnaise (SYTRAL) et son exploitant TCL.

Dans le principe, l'exploitant s'engage sur un coût *forfaitaire* lié à la réalisation d'un service défini par un cahier des charges et reçoit un *intéressement sur les recettes* en fonction d'un objectif fixé. SYTRAL, de son côté, met à disposition de l'exploitant les moyens de production de l'offre de transport, donc de ce point de vue réalise les investissements.

Dans ces conditions, l'intérêt du Maître d'Ouvrage est de choisir pour ses nouveaux moyens (lignes nouvelles, nouveaux matériels...) celui ou ceux qui, à niveau de service égal, coûteront le moins cher possible en fonctionnement.

Toute nouvelle ligne est donc une opportunité à réaliser un saut de productivité élevé. Dans le nouveau cadre contractuel, on voit bien également que tout nouveau moyen de transport performant sur le plan de la productivité doit également générer de nouvelles recettes.

Son intérêt c'est aussi *d'amortir le surinvestissement* qu'il aurait à consentir à cet égard sur une durée réaliste sur le plan économique.

De ce triple point de vue qui résume schématiquement les nouvelles attentes du maître de l'ouvrage, l'automatisation intégrale de l'exploitation peut démontrer un certain intérêt:

— La suppression de la fonction conduite aurait pu dégager à elle seule plus de 20% d'économie du coût d'exploitation de la ligne D en mode conventionnel. Les besoins exprimés par la clientèle nous ont amenés à décider d'en réinvestir une partie sous forme de présence accrue de personnel itinérant sur le site.

— Ainsi, le bilan prévisionnel d'exploitation consolidé, tenant compte des économies et des accroissements, se solde-t-il par une réduction de l'ordre de 10 MF par an par rapport à la référence conventionnelle, ce qui est de l'ordre de grandeur relative de 20%.

— La flexibilité d'exploitation, sur laquelle nous reviendrons plus loin, permettra d'offrir des fréquences améliorées dans des plages horaires où doivent se situer encore des marchés de clientèle, pour un coût marginal faible puisqu'il n'est plus composé que de la consommation énergétique et du coût de maintenance. Nous n'avons cependant pas pu chiffrer cet avantage en terme d'objectif de recette. Il restera donc à démontrer.

— Du point de vue de l'investissement, la comparaison de coût se résume au tableau 1.

Tableau 1: Comparaison, par poste d'investissement, des coûts entre une solution classique et MAGGALY

	MAGGALY MF*	Solution classique MF*
Commandes centralisées.....	128	93
Pilotage automatique.....	121	30
Matériel roulant.....	516	551
Equipements de sécurité en station.....	10	0
Maintenance - Documentation.....	36	21
Signalisation.....	37	41
Coordination générale garantie ingénierie, essais, préexploitation.....	200	113
	1 048	849

\* Prix HT - Janvier 1985.

C'est donc près de 200 MF supplémentaires dont le maître d'ouvrage doit assurer le financement:

- 25 MF sont accordés par l'Etat au titre de complément au subventionnement initial de l'opération ligne D,
- 5 MF au titre d'une participation de la RATP,
- 10 MF sont attendus au titre de l'aide à la recherche et au développement dans le cadre du Programme de Recherche et Développement Technologique des Transports Terrestres (PRDTTT),
- le solde pris en compte par la collectivité locale se trouvera en partie amorti grâce à l'économie d'exploitation dégagée. La rentabilité du projet est donc limitée; il faut observer à cet égard que la décision d'automatiser a été prise tardivement par rapport au démarrage de l'opération. C'est aussi le premier projet de ce type qui est développé en France par un groupe industriel nouveau.

Encore convient-il de souligner que la décision n'était pas motivée par ce seul critère. Il faut en effet en attendre des retombées tant au niveau local que national en terme d'image, de notoriété, d'intérêt général.

— Le tournant pris avec MAGGALY met le réseau en bonne position pour évoluer dans l'avenir. Il est pris également au bon moment: possible avec la ligne D et toutes les opportunités qui l'accompagnent (changement de pilotage automatique, nou-

#### Le métro de Vancouver (photo SEMALY)



veau PCC, nouveau matériel roulant), il serait difficile, donc coûteux au-delà (sommes de contraintes dues à l'existant = «poids du passé»).

## MAGGALY: la conduite automatique

— Les solutions adoptées pour les automatismes du Métro de Lyon utilisent:

- les principes déjà développés dans le cadre d'autres opérations:
- le canton mobile déformable issu des développements ARAMIS,
- le monoprocессeur codé utilisé pour le traitement des fonctions de sécurité du SACEM, (système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance) de la RATP.
- des développements spécifiques notamment dans le cadre des interfaces entre la commande centralisée, le pilotage automatique et la signalisation de manœuvre.

— Le pilotage automatique assure les fonctions:

soit *sécuritaires*:

- anticollision,
- contrôle du sens de la marche,
- antisurvitesse,
- contrôle de certains équipements des rames (portes...),
- commande des itinéraires,

... soit *fonctionnelles*:

- conduite automatique pour assurer les performances et le confort des voyageurs,
- aide à l'exploitation et à la maintenance.

— La commande des itinéraires, à l'inverse des métros traditionnels où cette fonction est assurée à partir d'ordres élaborés par la commande centralisée et transmis à la signalisation, sera traitée de manière différente sur la ligne D. En effet, cette fonction est réalisée en local avec une autonomie permettant de pallier les défaillances du système central pendant un temps de recouvrement minimum. Pour ce faire, le processus est le suivant:

- Une liste de missions nominatives est téléchargée depuis le PCC dans les automatismes locaux au niveau de zones affectées à cette fonction (garages, zone de transfert,...). Le premier parcours à effectuer est transmis avec anticipation à l'automatisme embarqué concerné qui initialise ainsi la mission.
- Lors de la circulation du véhicule en ligne, l'automatisme embarqué transmet son parcours aux automatismes sol rencontrés qui commandent la suite des itinéraires, au plus tard au fur et à mesure de la progression du train.
- En cas d'incident de durée supérieure à l'autonomie prévue, le parcours standard de retournement est affecté à chaque véhicule, afin d'établir une routine assurant le retournement.

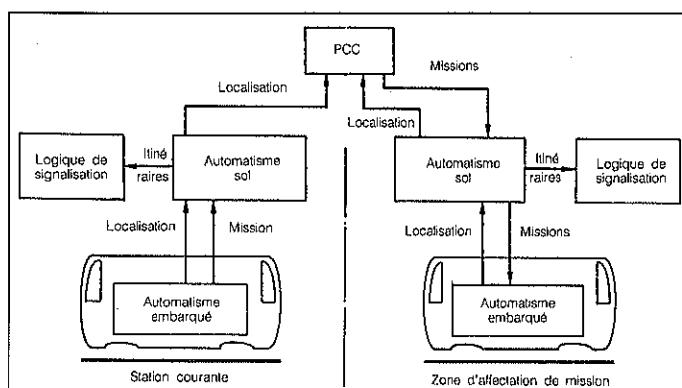


Figure 1: Principe de commande des itinéraires Fonctionnement nominal

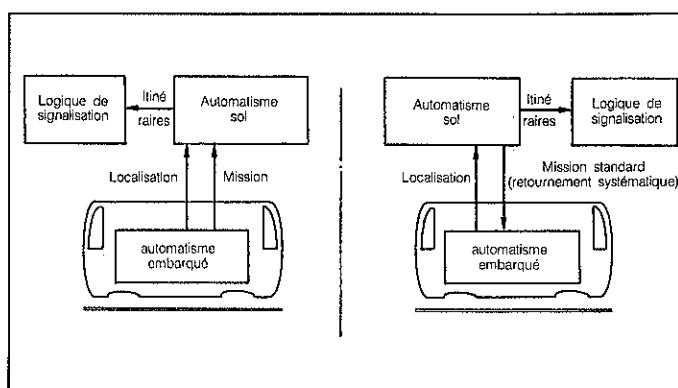


Figure 2: Principe de commande des itinéraires Mode dégradé

## L'intérêt de l'exploitant

L'exploitant bénéficiera naturellement lui aussi des avantages exposés ci-avant, notamment s'il arrive à accroître la fréquentation du réseau. Cet accroissement, au-delà de ce qui est normalement prévisible, pourrait notamment dépendre de la *qualité du service* dont l'automatisme est capable.

Sur les lignes A et B relativement automatisées, le maintien à bord du conducteur était indispensable pour assurer la continuité de service (reprise en manuel par suite de défaillance des automatismes, notamment de conduite), et pour assurer en sécurité le service voyageurs en station, notamment dans les phases d'arrivée en station, de fermeture des portes et de départ.

Son aptitude à régler des incidents, qui se raréfient de plus en plus dans le temps, est constamment en déséquilibre; le fait qu'il doive aussi servir d'intermédiaire de transmission pour l'exploitant et la maintenance par le biais d'un support phonique, souvent médiocre, ne donne pas aux échelons de décision des opérations ou de la maintenance, le niveau d'information suffisant.

De plus, l'effectif de cette catégorie de personnel se trouve forcément limité pour des raisons économiques: il en résulte une très faible aptitude à adapter l'offre à la demande de transport.

Pour terminer, reconnaissons que, dans un métro conventionnel, on ne peut régler les incidents d'exploitation en faisant abstraction des conditions de travail des conducteurs. Ceux-ci sont généralement exigeants sur les horaires de service, ce qui conduit à choisir des modes de régulation ou de résolution basés sur un horaire, ce qui est contraignant, alors que le voyageur ne demande au fond que de la régularité.

Par contre, l'automatisation intégrale permet de nuancer pratiquement à l'infini les programmes d'exploitation à la demi-journée, ou même mieux, alors qu'actuellement, nous ne disposons de guère plus de sept types d'horaires différents.

Au niveau de la *flexibilité*, l'automatisation permet de faire varier autour du programme nominal, la capacité offerte en fonction des imprévus (conditions météo, manifestations, etc.). Si de plus, comme cela a été prévu, on peut moduler la capacité unitaire des rames, on peut offrir un service collant au plus près à la réalité de la demande.

De la sorte, l'offre pourra être produite au plus près de la demande, donc au prix le plus juste. Ce nouveau processus de transport se rapprochera en cela d'un processus moderne d'approvisionnement/vente, où la quantité de produits mis en place dépend étroitement (parfois même en temps réel) du niveau de consommation.

Rappelons également que les économies réalisées de ce fait peuvent d'ailleurs être en partie réinvesties en offrant à la clientèle des fréquences supérieures pendant des heures creuses où existe un marché potentiel ce qui, en définitive, viendra valoriser par de nouvelles recettes le nouveau service offert.

Reste l'*aspect social et sociologique*; il faut constater d'abord que le métier de conducteur dans un métro à haut niveau d'automatisme ne peut être considéré que comme un stade d'évolution dans une avancée technologique inachevée et non comme une finalité, même si actuellement des personnes s'en accommodent fort bien. C'est tellement vrai que la RATP, qui était en train de généraliser sur ses lignes urbaines le pilotage automatique, a décidé de réintroduire un certain degré d'activité du conducteur dans des fonctions dites de *Conduite Manuelle Contrôlée*.

Au plan social, le problème ne se pose pas à Lyon en terme de reconversion puisqu'il s'agit d'une création de ligne. Il s'agit donc moins pour nous de supprimer certaines catégories de personnel que de faire évoluer des métiers en leur trouvant une nouvelle valorisation.

Dans notre cas, on substituera à l'ensemble des trois postes (Agents de station, Contrôleur de ligne, Conducteur), une seule fonction, celle d'*«Agent d'Opérations en ligne» (AOL)*, qui est basée sur la notion d'agent itinérant, tant dans les stations que dans les trains, chargé du contact direct avec les voyageurs (fonction commerciale, et d'intervenir chaque fois que nécessaire en des actions simples pour maintenir ou rétablir le service (reconfiguration de systèmes, prise en conduite manuelle et acheminement de trains défectueux...).

La perspective, pour un réseau moderne, de rester à la pointe a un effet mobilisateur pendant la période de réalisation et d'intégration. Elle est génératrice de progrès pour les hommes au-delà, car elle leur offrira la possibilité d'élever et de diversifier leur qualification.

## MAGGALY: l'approche des problèmes de sécurité

### La démarche

• Contrairement à la situation des systèmes automatiques conçus comme tels à l'origine, l'automatisation de la ligne D du métro s'apparente plus à celle d'un réseau existant. L'approche des problèmes de sécurité doit donc tenir compte de:

— l'existence des infrastructures, déjà largement réalisées; il n'a pas été possible de réduire la longueur des stations en jouant sur une circulation plus intense de trains de plus petites dimensions; la présence d'un grand nombre de mezzanines ouvertes sur les quais ou les voies a conduit le SYTRAL à envisager, pour des raisons architecturales ou financières, de ne pas isoler totalement (comme à Lille) le site de circulation des trains des espaces accessibles aux voyageurs,

— la nécessaire standardisation des matériels avec ceux des lignes A et B, afin de bénéficier des économies d'échelle pour l'entretien de ceux-ci,

— l'unicité du mode d'organisation de l'exploitation, afin de pouvoir banaliser au maximum le personnel d'exploitation aussi bien en ligne qu'au poste de commande centralisée,

— pour le voyageur, un mode d'utilisation aussi homogène que possible avec celui des lignes A et B: mêmes dispositions générales des équipements mis à sa disposition sur les quais et dans les trains.

Ceci a conduit l'autorité organisatrice à proposer une démarche spécifique pour l'instruction des choix des dispositifs de protection des voyageurs dans les stations et notamment lors de l'échange quai-rame. Ces dispositifs concernent essentiellement les fonctions suivantes:

- chutes sur la voie,
- entraînement au démarrage,
- intrusion dans le site,
- engagement dans la lacune.

L'objectif minimum fixé par l'autorité organisatrice est d'avoir, pour ces fonctions, un niveau de sécurité au moins équivalent à celui obtenu sur les lignes A et B existantes exploitées avec un conducteur.

Pour juger si cet objectif sera respecté, la méthodologie suivante est appliquée:

- établissement d'une liste de cas type d'incident,
  - analyse des scénarios d'incident avec les dispositifs envisagés (voir tableau 2 la fiche d'analyse d'incident et ses commentaires),
  - définition des conditions d'exploitation de ces dispositifs en mode nominal et dégradé,
  - analyse technologique comportant:
    - une évaluation des performances de détection,

- une analyse de fiabilité, disponibilité,
  - une expérimentation.

C'est le bilan global de tous ces éléments qui permettra de juger la faisabilité du système et ses aménagements éventuels.

En ce qui concerne les automatismes ferroviaires, l'approche de la sécurité est similaire à celle mise en œuvre pour les projets équivalents que sont notamment SACEM ou ARAMIS.

Tableau 2: Type d'incident analysé: chute sur la voie d'une personne devant le train. Distance suffisante pour freiner

### Commentaires sur le tableau 2

- Le conducteur anticipe la détection de chute d'une personne. Cette anticipation peut faire gagner un temps correspondant à la distance à parcourir depuis la perception de la personne sur le quai et:
    - l'instant où la personne franchit le nez de quai pour le système d'analyse d'images,
    - l'instant où la personne coupe les faisceaux du système à infrarouge actif

A noter que cette anticipation est atténuée d'autant :

- A noter que cette anticipation est attendue d'autant :  
— si la personne est masquée par la foule,  
— si le conducteur ne s'attend pas à ce type d'accident (accoutumance).

— Les performances du système de freinage d'urgence (FU) de MAGGALY permettent de réduire le temps d'application du FU de 0,3 à 0,50 secondes.

— La comparaison au plan technique qui peut être faite est celle du temps entre la perception ou la détection du danger et l'ouverture de la boucle EIU.

Dans le cas des lignes A et B c'est le temps de réaction du conducteur, considérée comme une réaction réflexe suivi d'une action simple. La littérature spécialisée permet d'évaluer ce temps à 0,5 s.

Dans le système MAGGALY c'est le temps de transmission de l'information entre l'élaboration par la logique traction et l'ouverture de la boucle FU train par l'UGE sur absence IS sur la section. Ce temps se décompose en :

- ouverture boucle RU — coupure IS, HT et AUR: 50 ms (logique traction)
  - transmission PCC — UGTS: négligeable
  - traitement coupure IS par l'UGTS
  - transmission UGTS — UGE 1,20 sec.
  - traitement UGE (y compris ouverture boucle FU).

— Le système actuel des lignes A et B permet en priorité d'empêcher le choc physique avec la personne (action BP FU) puis de couper le courant pour empêcher l'électrocution. Dans le système MAGGALY c'est l'inverse.

### Les solutions envisagées

Compte tenu de l'orientation choisie par les autorités locales, des recherches ont été engagées pour définir et mettre au point d'autres systèmes permettant d'atteindre un niveau de sécurité aussi élevé que possible (et au moins égal à celui des lignes A et B). Bien qu'il soit encore trop tôt pour être certain des choix qui seront effectués, ceux-ci s'orientent actuellement vers trois types de dispositifs :

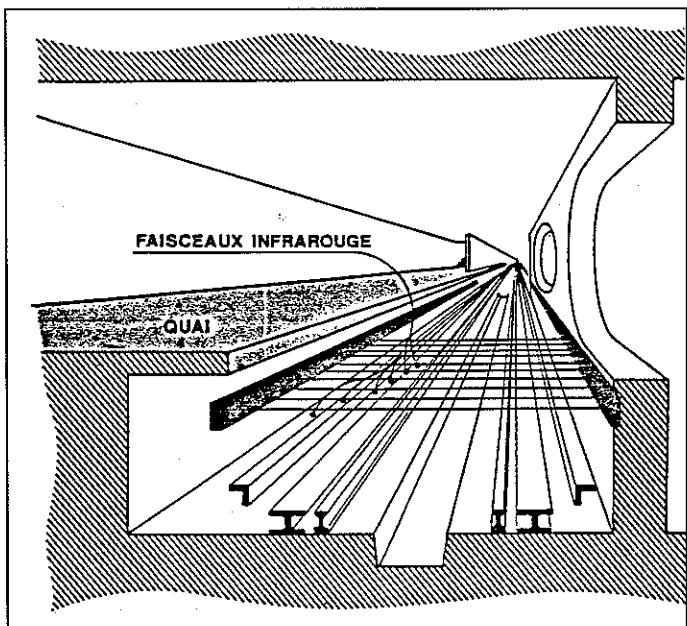


Figure 3: Dispositif infrarouge actif

- l'équipement des portes des véhicules de bords sensibles détectant tout coincement d'objets lors de la séquence de démarrage, et entraînant l'arrêt immédiat du train,
- la mise en place de systèmes de détection de pénétration dans l'espace des voies, par détecteurs infrarouge ou analyse d'images, système entraînant l'arrêt des trains avant de rencontrer l'obstacle (si la distance d'arrêt le permet),
- le contrôle ou la fermeture de toutes les possibilités de pénétrer en tunnel, par l'obturation des extrémités de quais et la mise en place de barrières optiques là où cela est nécessaire,
- la mise en place de palettes au droit des portes, afin d'éviter les engagements dans la lacune au moment des échanges en station.

On notera que, parmi les métros automatiques en service, celui de Vancouver (ouvert au public depuis le 1<sup>er</sup> janvier 1986) a pris des dispositions analogues (portes à bords sensibles, système de détection de chute sur la voie par tapis sensible aux vibrations).

Si de tels dispositifs s'avèrent adéquats, il est clair qu'ils représenteront un atout important pour l'automatisation de réseaux existants, pour lesquels les contraintes peuvent rendre difficile (voire impossible) l'utilisation de portes palières automatiques.

#### *Description sommaire des dispositifs envisagés de détection de pénétration de l'espace des voies*

Compte tenu du temps disponible, les recherches se sont orientées vers des systèmes déjà utilisés, mais dans d'autres domaines. Ceci nécessitera donc une adaptation et une démonstration de faisabilité par la démarche citée ci-avant.

#### *Dispositif avec détecteur infrarouge actif (figure 3)*

Ce système, élaboré par la Société Jay Electronique, est transposé du dispositif de détection de personnes développé pour la remise en marche automatique des escaliers mécaniques.

Il utilise la détection par coupure de faisceaux infrarouge modulés disposés perpendiculairement à l'axe des voies en dessous du niveau des quais, le sens d'émission étant inversé entre deux faisceaux successifs, pour constituer deux ensembles: un de faisceaux «droits» et un de faisceaux «gauches». L'ensemble des cellules est raccordé à un microprocesseur qui les scrute cycliquement.

Il y a détection d'un objet lorsque deux faisceaux consécutifs droits ou gauches sont occultés.

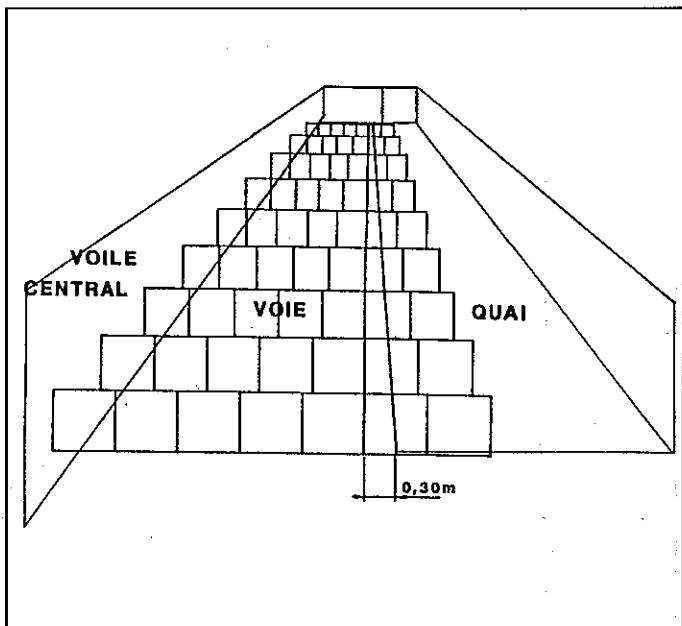


Figure 4: Dispositif par analyse d'image

En prolongeant le dispositif dans le tunnel, on peut détecter l'arrivée d'un train et inhiber devant lui les faisceaux au fur et à mesure de sa progression. Le système se réinitialise d'une manière identique derrière le train.

Les faisceaux sont occultés à chaque passage de rame, ce qui permet un contrôle quasi permanent de leur état de fonctionnement. Par ailleurs, afin d'améliorer le niveau de disponibilité, le système est entièrement redondé et les sorties sont mises en ET.

#### *Dispositif par analyse d'image (figure 4)*

Ce système, conçu par la Société Canadienne Computing Devices Systems, a surtout été utilisé pour la protection de sites stratégiques. Il utilise des caméras de bonne définition prenant l'image du quai et notamment la transition quai-voie.

Par programmation, il est défini:

- sur l'écran: une zone de détection, constituée d'un ensemble de petits modules prenant en compte l'effet de champ,
- une taille mini et une taille maxi de l'objet à détecter,
- les sens de déplacement des objets.

Les données vidéo sont intégrées (moyennées) dans le temps et dans l'espace pour obtenir un niveau moyen dans chaque module. L'arrière plan de chaque module est ôté et la détection préliminaire se fait sur la base de changement de contraste, clarté au niveau de chaque module.

Pour qu'une alarme soit élaborée, une cible doit être détectée et suivie logiquement au travers de plusieurs modules pré-déterminés en suivant les transitions entre ces modules (1 à 4 paramétrables).

## Conclusion

Cette réalisation, qui va constituer une première dans le monde (il s'agit d'automatiser un métro existant qui a démarré il y a 8 ans sur des bases conventionnelles), est une nouvelle page du catalogue de l'ingénierie française en matière de transports publics urbains. Cette référence devrait entraîner des retombées, non seulement locales, mais au plan national, tant pour l'ingénierie que pour l'industrie.

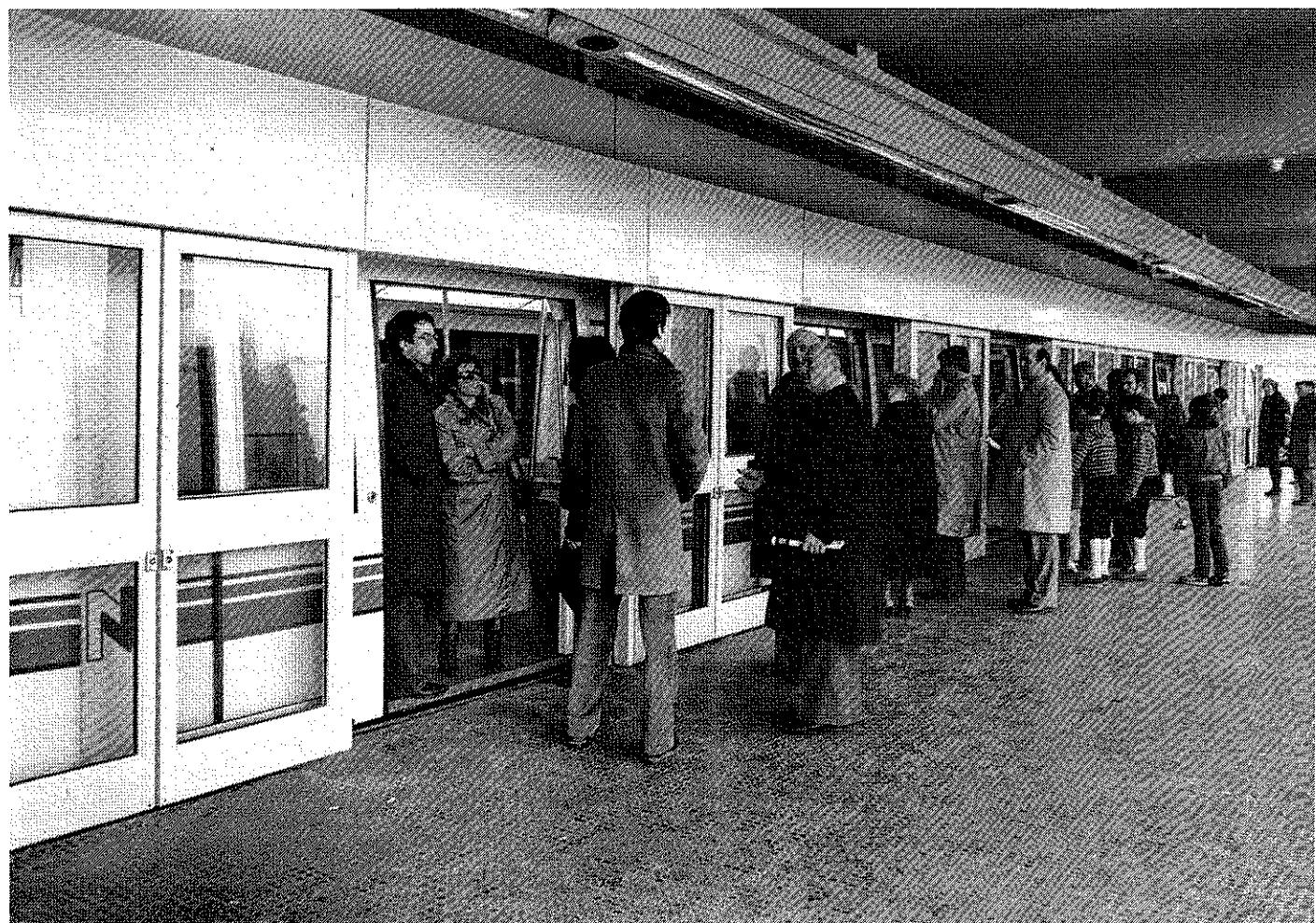
# Etude économétrique de la fréquentation du métro de Lille

Serge DORMARD

Professeur à l'Université  
de Lille I

Odile HEDDEBAUT

Chargée de mission  
au Conseil Régional  
Nord-Pas-de-Calais



Le 16 mai 1983, une première section du métro de Lille (VAL) est mise en service payant. Le succès paraît avoir été immédiat. De 1982 à 1983, le nombre d'usagers des transports collectifs dans la Communauté urbaine augmente de plus de 22%, et, entre le centre de Lille et Villeneuve d'Ascq, il est multiplié par trois. Plus du quart de ces déplacements s'effectue grâce au métro. Depuis mai 1984, avec la mise en service du tronçon République-Centre Hospitalier Régional, la totalité de la ligne n° 1 est ouverte au public.

Trois ans après, quel bilan peut-on dresser de ce nouveau mode de transport? Un travail précédent (1) a déjà montré, à partir d'enquêtes auprès des usagers, que ces derniers ont parfaitement accepté, et même apprécié, les innovations majeures du VAL. Il a aussi permis de constater que de nombreux usagers ont renoncé à l'utilisation de leurs véhicules individuels. La rapidité ainsi que la qualité de service offerte paraissent avoir été déterminants dans les choix individuels en faveur de ce nouveau mode de transport.

L'objet de cet article est d'analyser l'évolution de la fréquentation du métro de Lille telle qu'elle apparaît à travers les chiffres de compostages et de voyages. A l'aide de techniques économétriques simples, nous allons tenter de dégager les principaux facteurs explicatifs de l'évolution mensuelle du trafic du métro, ce qui permettra, à la fois, de réaliser des prévisions de trafic futur et de fournir quelques moyens d'appréciation sur la politique menée par les responsables de l'exploitation de ce mode de transport.

# De la ville nouvelle au Véhicule Automatique Léger (VAL)

La naissance du métro de Lille est liée au développement de la ville nouvelle de Villeneuve-d'Ascq, à l'est de Lille, au début des années soixante-dix.

L'étude des différents projets de villes nouvelles dans le monde avait montré combien il était important de ne pas dissocier les aspects de croissance urbaine des problèmes liés aux déplacements des individus, qu'ils soient réalisés au moyen de transports collectifs ou individuels. Tout projet de ville nouvelle doit donc s'accompagner nécessairement de l'examen des moyens de transport qui seront mis à la disposition de sa population.

En février 1968, l'OREAM-Nord, dans son livre blanc, préconisait l'étude d'une liaison entre la ville nouvelle et Lille. Pour répondre à ce besoin, un premier projet était envisagé qui mettait en œuvre un système de transport automatisé en boucle assurant un rabattement sur la gare SNCF d'Annappes. Mais ce projet n'a pu aboutir en raison de la difficulté due aux encombrements qu'aurait représenté, pour la SNCF, le fonctionnement d'une navette cadencée entre les gares de Lille et d'Annappes.

Aussi, la direction de l'EPALE (Etablissement Public pour l'Aménagement de Lille-Est) a-t-elle envisagé la réalisation d'une ligne de transport en commun entre la ville nouvelle et la gare de Lille, devant desservir les quartiers à forte densité démographique de Fives et la ZUP de Mons-en-Baroeul. Cette ligne étant beaucoup plus longue, il a été nécessaire de reprendre de manière fondamentale l'étude du projet.

L'une des caractéristiques les plus importantes que l'EPALE envisageait d'imposer au futur constructeur était l'obtention d'une qualité de service apte à provoquer un transfert modal de l'automobile vers les transports en commun. Ceci afin d'éviter que les déplacements en voiture individuelle ne viennent accroître l'encombrement du centre de Lille. Ce transfert modal était d'autant plus difficile à obtenir qu'à l'époque, personne ne soupçonnait l'imminence des divers chocs pétroliers et que rien ne semblait pouvoir enrayer la croissance du taux de motorisation des ménages.

Afin de concurrencer la voiture, il fallait donc un système de transport public qui soit rapide et peu onéreux. D'où l'orientation vers un transport en site propre et, grande nouveauté, entièrement automatisé. La première ligne de métro est ouverte au public en mai 1983. Elle doit, dans l'esprit de ses initiateurs, servir de base à l'élaboration d'un véritable réseau devant drainer l'ensemble de la métropole, comprenant d'abord la ligne 1 bis vers Lomme, en attendant, en 1990, la ligne n° 2 vers Roubaix-Tourcoing.

## Analyse économétrique du trafic du métro de Lille

Si le succès apparaît indéniable en 1983 lors de l'ouverture de la première ligne, qu'en est-il trois ans après? En particulier, comment a évolué la fréquentation du métro pendant ces années? Nous allons tenter de répondre à ces questions en étudiant les séries de chiffres mensuels de compostages et de voyages.

Les chiffres utilisés pour les compostages sont ceux relevés dans les diverses stations du réseau, tels qu'ils ont été fournis par la COMELI et exploités par le CRESTA (Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transports Automatisés) (2). Les flux mensuels de voyages proviennent des enquêtes périodiques effectuées sur le réseau par la Communauté Urbaine de Lille.

L'écart entre les deux séries résulte de l'existence de cartes d'abonnement hebdomadaires ou mensuelles. Le graphique ci-dessous montre que cet écart a grandi avec le temps, prou-

Bien que le tracé de la ligne n° 1 ait été modifié, sous la pression des populations locales, par rapport à celui sur la base duquel les études prévisionnelles de la demande avaient été faites, on a pu constater, dès sa mise en service, une forte augmentation du nombre de voyageurs utilisant les transports collectifs. Ainsi, selon des enquêtes réalisées par le CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement), le nombre de déplacements par jour ouvrable sur l'ensemble du réseau de transports collectifs urbains de Lille est passé de 172 200 en 1982 à 210 900 en 1983, soit une augmentation de plus de 22%. Le flux de voyageurs entre le centre de Lille et Villeneuve-d'Ascq a, pendant cette période, été multiplié par trois. Enfin, et surtout, un déplacement sur quatre a été effectué en métro.

L'enquête réalisée en 1983-1984 par le Laboratoire d'Economie Publique, Urbaine et Régionale (LEPUR) (1) auprès d'un échantillon de 1 500 personnes utilisant le métro a permis de mieux connaître les comportements des usagers de ce nouveau mode de transport.

D'abord, on a pu observer un certain changement dans le type de clientèle fréquentant les transports publics de l'agglomération lilloise. Avant l'ouverture du VAL, 59% de cette clientèle était composée de femmes; après l'ouverture, le pourcentage représenté par les hommes devient prépondérant, 57% contre 43% pour les femmes.

L'enquête a aussi permis de constater que les personnes interrogées considèrent comme les innovations majeures du métro de Lille:

1. la fréquence et la vitesse élevées des véhicules;
2. l'existence de portes palières sur les quais;
3. la totale accessibilité du métro, en particulier pour les personnes à mobilité réduite;
4. les facilités de communication avec le poste central de commande (interphones rames-stations).

Environ 95% des personnes interrogées déclarent éprouver un sentiment de sécurité au sein du métro lillois. On notera que l'absence de conducteur, malgré son aspect spectaculaire, ne vient dans les classements des personnes interrogées que loin après les innovations ci-dessus, ce qui prouve l'importance que les usagers attachent à l'aspect pratique de ce mode de transport. L'enquête a aussi montré que 16% environ des usagers du métro étaient d'anciens conducteurs d'automobiles, ce qui confirme l'existence d'un transfert modal non négligeable en faveur des transports collectifs.

## Analyse économétrique du trafic du métro de Lille

vant ainsi le succès auprès des usagers des diverses formules d'abonnement.

Disposant d'une série continue sur plus de trois années de données chiffrées (juillet 1983-septembre 1986) concernant le trafic du métro de Lille, l'économiste est tenté, pour en savoir plus, d'utiliser certains instruments de l'analyse statistique. La technique utilisée dans cet article consiste à supposer une relation linéaire entre une variable «expliquée», en l'occurrence le nombre de compostages ou de voyages, et un certain nombre de variables «explicatives», puis à évaluer les coefficients des variables explicatives. Cette évaluation est réalisée grâce à la «méthode des moindres carrés» qui retient les coefficients, appelés aussi «estimateurs», pour lesquels les écarts (élevés au carré) entre les valeurs observées de la variable expliquée et celles fournies par la relation utilisée sont les plus faibles possibles. La méthode permet ainsi de trouver le «modèle» qui reproduit le plus correctement possible l'évolution du nombre de compostages ou du nombre de voyages.

## Le trafic croît-il avec le temps?

La première impression que l'on peut avoir, au simple vu des chiffres (voir graphique), est celle d'une augmentation progressive et continue du nombre d'usagers sur la période retenue (3). Mais on peut se demander si cette impression est fondée ou si elle n'est seulement qu'une simple illusion?

Pour répondre à cette interrogation, on peut appliquer la méthode des moindres carrés à la relation entre le nombre mensuel de compostages ou le nombre mensuel de voyages et une variable temporelle, notée TEMPS, égale à 1 en juillet 1983, à 2 en août 1983,... et à 39 en septembre 1986. Afin de tenir compte du changement d'offre entraîné par l'ouverture du tronçon République-CHR en mai 1984, nous utiliserons une variable spécifique, notée OFFRE, égale à 0 de juillet 1983 à avril 1984 et à 1 après cette date. On obtient les résultats suivants:

— pour les compostages:

$$\text{COMP} = 224\,941 \cdot \text{OFFRE} + 1\,742 \cdot \text{TEMPS} + 577\,356$$

(2,97) (0,59)

$$\begin{aligned} R^2 &= 0,44 \\ F &= 14 \\ DW &= 1,37 \end{aligned}$$

la variable COMP correspondant au nombre de compostages mensuels sur la période juillet 1983-septembre 1986.

Selon les résultats obtenus, le nombre mensuel de compostages croît, chaque mois, de 1 742. On constate aussi que l'ouverture du deuxième tronçon de la ligne de métro aurait augmenté ce nombre de 224 941.

Cependant, ces résultats ne suffisent pas. Il faut s'assurer de la bonne qualité de la relation obtenue. Entre parenthèses, sous chaque coefficient estimé, figure un nombre, appelé «*t*» de Student, calculé à partir des données utilisées et qui doit être comparé à celui figurant dans une table de référence (ici, la table donne un chiffre égal à 1,96). Si le *t* de Student est supérieur à ce nombre, on admettra que la variable correspondante est significativement différente de 0 (à 95%).

C'est le cas de la variable OFFRE, mais cela prouve simplement que l'ouverture de la deuxième partie de la ligne a accru le nombre total d'usagers. Un résultat contraire eût paru étonnant. En revanche, le *t* de Student de la variable TEMPS, égal à 0,59 est trop faible. Cela signifie que le coefficient estimé de cette variable, soit 1 742, qui est en fait une variable aléatoire, ne peut être considéré comme différent de zéro. Il n'est donc pas possible de supposer que le nombre de compostages croît avec le temps.

Les autres paramètres calculés fournissent des informations complémentaires sur la qualité de la régression effectuée. Lorsque celle-ci est bonne, le coefficient de détermination *R*<sup>2</sup> doit être proche de l'unité. Le chiffre obtenu, 0,44, apparaît trop faible. Pour vérifier que les estimateurs ne sont pas tous globalement égaux à zéro, le nombre calculé *F* doit être supérieur à un nombre fourni par la table dite du *F* de Fisher-Snedecor (ici égal à 3,3). C'est le cas puisque le *F* calculé s'élève à 14. Mais ceci résulte du fait que la variable OFFRE est significativement différente de zéro. Enfin, le coefficient de Durbin-Watson indique s'il existe un risque d'autocorrélation entre les erreurs du modèle. Il doit être comparé à des valeurs fournies par la table de Durbin-Watson. Le chiffre obtenu ici, 1,37, apparaît insuffisant pour éviter ce phénomène d'autocorrélation des erreurs, ce qui renforce le sentiment de la mauvaise qualité de la régression.

Notre conclusion est donc que le nombre mensuel de compostages ne croît pas avec le temps.

— pour les voyages:

$$\text{VOY} = 1\,029\,780 \cdot \text{OFFRE} + 2\,449 \cdot \text{TEMPS} + 1\,150\,642$$

(4,6) (0,28)

$$\begin{aligned} R^2 &= 0,60 \\ F &= 27 \\ DW &= 1,11 \end{aligned}$$

La variable VOY étant le nombre de voyages mensuels sur la période juillet 1983-juin 1986. Entre parenthèses figurent les *t* de Student.

Bien que les résultats apparaissent un peu meilleurs que ceux obtenus pour les compostages, leur interprétation demeure la même. Le coefficient estimé de la variable temps ne semble pas significativement différent de zéro. De plus, le coefficient de détermination (*R*<sup>2</sup>) reste relativement faible, ce qui signifie qu'une grande partie de l'évolution du nombre de voyages demeure inexpliquée.

En conséquence, aussi bien pour les compostages que les voyages, il n'est pas possible de conclure à leur augmentation continue dans le temps.

## La recherche de variables explicatives

### Les variables retenues

Afin de fournir une explication au phénomène étudié, nous allons faire appel à diverses variables socio-économiques. Nous conserverons la variable offre, définie précédemment, qui permet de prendre en compte le changement d'offre dû à l'ouverture de la deuxième partie de la ligne.

On peut se demander si l'évolution du nombre d'usagers n'a pas été influencée par les tarifs perçus depuis l'ouverture du métro. L'idéal serait d'utiliser un prix relatif tenant compte du coût des autres modes de transport, par exemple, du coût de déplacement en voiture individuelle. Faute de données précises et périodiques concernant ce dernier, nous avons retenu uniquement l'évolution du coût du transport collectif. Puisque nous nous intéressons à l'ensemble des flux de voyageurs, nous avons calculé une moyenne pondérée des différentes formes de tarification (billet simple, carnet de 10 billets, carte hebdomadaire, carte mensuelle). Cette variable, notée tarif, présentée sous forme d'un indice mensuel (juillet 1983 = 100), sera exprimée soit en valeur nominale, soit en valeur réelle. Ceci permettra de connaître le degré d'illusion monétaire des usagers du métro.

Les changements de tarifs ayant été peu fréquents depuis 1983, en général ils sont modifiés une fois par an (4), cela ne suffit pas pour expliquer l'évolution du nombre d'usagers. D'autres facteurs interviennent, en particulier la qualité du service. En effet, les études entreprises par ailleurs montrent toutes que les voyageurs sont sensibles au niveau de confort offert pour leurs déplacements en transport collectif. Cependant, ce type de variable paraît difficile à quantifier. Nous verrons plus loin le rôle spécifique que peut jouer dans ce domaine le nombre de tranches horaires.

L'examen des chiffres de compostages ou du nombre de voyageurs montre d'importantes fluctuations mensuelles, baisse du trafic en juillet et août, forte hausse en septembre et octobre, par exemple. Ces mouvements saisonniers peuvent s'expliquer, pour certains d'entre eux, de manière spécifique: baisse de l'activité, et donc des déplacements, pendant les mois d'été, rentrées scolaires et universitaires en septembre et octobre. Afin de prendre en compte ces mouvements périodiques, nous avons utilisé des variables auxiliaires, notées M1, M2,... M11, égales à 1 le mois correspondant et 0 les mois suivants. La variable M1 concerne le mois de juillet, M2, le mois d'août, etc.

(1) O. Heddebaut-Gabillard, «Effets sur la clientèle d'un changement de l'offre dans le domaine du transport collectif urbain de voyageurs — Le cas du VAL de Lille», Thèse 3<sup>e</sup> Cycle, Lille I, septembre 1985.

(2) Les chiffres utilisés comprennent les compostages d'usagers empruntant le tramway. Cependant, l'écart entre les deux séries de chiffres étant à peu près constant, de l'ordre de 50 000, cela n'affecte pas les résultats qui suivent.

(3) Sur le graphique figure, en traits pleins, les nombres mensuels réels de compostages et de voyageurs. On notera l'écart croissant entre les 2 courbes, ce qui prouve le succès de la formule des cartes hebdomadaires et mensuelles.

(4) Sauf en 1984, où les tarifs ont été augmentés de 10% au mois de janvier, puis diminués en février afin de ramener la hausse au chiffre officiel de 5%, pour être augmentés de nouveau au mois de mai.

Le coefficient obtenu pour chacune de ces onze variables mensuelles permettra alors de définir l'écart de trafic de ce mois par rapport au douzième mois, ici le mois de juin. Ainsi, il deviendra possible de prendre en compte les fluctuations mensuelles de trafic, de les mesurer et, éventuellement, de les corriger.

Enfin, afin d'appréhender l'effet éventuel du contexte socio-économique général sur les comportements des individus en matière de transport collectif, nous avons utilisé une variable temporelle (temps), définie comme précédemment. Par rapport aux variables saisonnières définies ci-dessus, cette variable aura pour fonction de mesurer la tendance (trend) du trafic.

### Premiers résultats

Nous allons, dans un premier temps, calculer les estimateurs des variables définies ci-dessus: offre, M1,... M11, tarif et temps. Après application de la méthode des moindres carrés ordinaires, on obtient les résultats figurant dans les colonnes 1 (compostages) et 4 (voyages) du tableau 1. Dans l'ensemble, tant pour les compostages que les voyages, les résultats apparaissent, sur le plan statistique, parfaitement significatifs. Les coefficients de détermination R2 sont proches de l'unité. La plupart des t de Student, le F de Fisher-Snedecor et les coefficients de Durbin-Watson sont suffisamment élevés (les différentes tables donnent: t = 2,05, F = 2,6 et D.W. = 1,58). Ceci permet de conclure que l'évolution de la fréquentation du métro de Lille est correctement expliquée par les variables retenues.

Comme précédemment, la variable offre doit être prise en considération. Concrètement, les résultats du tableau 1 montrent

que l'ouverture de la seconde partie du réseau en mai 1984 aurait augmenté de 229 223 le nombre mensuel de compostages et de 1 060 410 celui des voyages.

Des fluctuations mensuelles apparaissent clairement. Les mois de juillet et août sont marqués par des baisses moyennes de 168 207 et 257 901 compostages et de 418 619 et 658 347 voyages par rapport au mois de juin. Les mois suivants, surtout septembre et octobre, connaissent une forte progression du trafic. Les coefficients des mois de février à mai apparaissent statistiquement non différents de 0. Ceci signifie que pour ces mois l'évolution du trafic ne diffère pas, de façon sensible, de celle du mois de juin.

Les coefficients estimés des variables tarif et temps ne semblent pas significativement différents de 0 (5). Les usagers du métro apparaissent donc peu sensibles à l'évolution du prix payé pour le transport. Comme nous l'avons vérifié précédemment, aucun mouvement de croissance dans le temps ne peut être décelé.

Cependant, on constate une assez forte collinéarité entre les variables tarif et temps, due simplement au fait que les tarifs ont augmenté, du moins en valeur nominale, régulièrement dans le temps. Il apparaît donc possible de ne retenir qu'une des deux variables. Les meilleurs résultats sont obtenus si l'on conserve la variable temps (colonnes 2 et 5 du tableau 1). Pour les compostages, la variable temps apparaît maintenant significative. Cependant, le coefficient estimé de cette variable devient très faible, 1 846 compostages par mois contre 2 157 dans le

(5) Les résultats restent identiques dans le cas d'une variable tarif exprimée en valeurs réelles.

Tableau 1: Résultats des tests économétriques

Variables	COMPOSTAGES			VOYAGES		
	Coefficients estimés			Coefficients estimés		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
OFFRE.....	229 223 (8,13)	234 772 (10,4)	235 788 (11,1)	1 060 410 (8,5)	1 115 292 (11,1)	1 121 430 (12,7)
M1.....	- 168 207 (- 5,57)	- 167 205 (- 5,66)	- 168 207 (- 6,0)	- 418 619 (- 3,13)	- 408 704 (- 3,1)	- 414 756 (- 3,57)
M2.....	- 257 901 (- 8,39)	- 255 799 (- 8,65)	- 254 924 (- 9,11)	- 658 347 (- 4,84)	- 637 559 (- 4,83)	- 632 274 (- 5,44)
M3.....	137 906 (4,36)	141 068 (4,76)	143 820 (5,12)	236 539 (1,69)	267 810 (2,02)	284 432 (2,44)
M4.....	167 801 (4,78)	172 420 (5,42)	174 001 (5,78)	496 058 (3,19)	541 744 (3,81)	551 291 (4,41)
M5.....	87 661 (2,39)	93 484 (2,94)	96 943 (3,22)	454 970 (2,8)	512 569 (3,61)	533 454 (4,26)
M6.....	91 160 (2,37)	98 135 (3,09)	103 471 (3,43)	213 107 (1,25)	282 099 (1,98)	314 321 (2,5)
M7.....	72 394 (2,15)	75 370 (2,37)	66 322 (2,18)	354 212 (2,38)	383 647 (2,7)	329 007 (2,6)
M8.....	- 16 167 (- 0,44)	- 9 779 (- 0,31)	- 16 950 (- 0,56)	114 932 (0,69)	178 116 (1,25)	134 813 (1,07)
M9.....	19 070 (0,48)	26 558 (0,83)	21 264 (0,70)	290 443 (1,67)	364 501 (2,55)	332 535 (2,64)
M10.....	20 478 (0,62)	21 706 (0,67)	18 290 (0,60)	174 876 (1,2)	187 020 (1,3)	166 392 (1,32)
M11.....	39 029 (1,21)	38 140 (1,21)	36 262 (1,22)	104 106 (0,73)	95 312 (0,68)	83 975 (0,68)
TARIF.....	- 1 577 (- 0,34)			- 15 597 (- 0,76)		
CONFORT.....			48 783 (1,98)			294 597 (2,88)
TEMPS.....	2 157 (1,70)	1 846 (2,14)	- 31 (0,03)	4 669 (0,83)	1 594 (0,41)	- 9 743 (- 1,88)
Constante.....	715 910	557 188	568 706	1 060 410	988 217	1 057 774
R2.....	0,968	0,968	0,973	0,950	0,949	0,962
F-Fisher.....	52	58	61	32	35	43
DW.....	1,67	1,67	1,82	1,71	1,75	2,04

(entre parenthèses figurent les t de Student).

premier modèle (colonne 1 du tableau), soit 22 150 par an, ce qui ne représente que 2,8% du nombre moyen de compostages. L'effet du temps peut donc être considéré comme négligeable. Le nombre de voyages continue lui à être indépendant du temps.

#### Nombre de tranches horaires et qualité de service

Les responsables de l'exploitation du VAL se sont vite rendu compte que le nombre d'usagers fluctuait largement dans une journée. En conséquence, afin d'éviter des encombrements excessifs aux heures de pointe ou, inversement, de faire fonctionner des rames vides ou presque aux heures creuses, ils ont cherché à optimiser le rythme de passage de ces rames. Ceci a conduit à la définition journalière d'un nombre de tranches horaires, c'est-à-dire du nombre de changements de la fréquence de passage des rames. Un nombre de tranches horaires plus élevé signifie une meilleure adaptation de l'offre à la demande, en quantité mais aussi en qualité. En effet, l'augmentation du nombre de rames aux heures de pointe permet d'améliorer le niveau de confort des voyageurs.

Cette dualité empêche d'utiliser tel quel le nombre de tranches horaires comme indicateur de la qualité du service de transport. Les mois où le volume de trafic est réduit, juillet et août par exemple, le nombre de tranches horaires est faible sans que cela soit le signe d'une mauvaise qualité de service. Cependant, si l'on regarde de près, on remarque qu'un changement notable s'est produit en janvier 1985. En effet, le nombre de tranches horaires augmente alors, sans que le kilométrage effectué par l'ensemble des rames soit modifié et sans que l'on constate un accroissement notable du trafic, ce qui est le signe évident d'un effort d'amélioration de la qualité de service. Afin de prendre en compte ce changement, nous allons utiliser une nouvelle variable, appelée confort, égale à 0 jusqu'en décembre 1984, puis à 1 à partir de janvier 1985.

Les résultats obtenus figurent dans les colonnes 3 et 6 du tableau 1. On constate que cette nouvelle variable permet d'améliorer de façon sensible les résultats antérieurs. Les indicateurs de la qualité de la régression progressent en valeur (on notera notamment le chiffre très élevé du coefficient de détermination).

Les coefficients des variables saisonnières ne sont pas modifiées de façon importante. Pour les compostages comme pour les voyages, la variable temps n'est plus significative, son coefficient devenant même négatif dans les deux cas.

Le coefficient de la variable confort apparaît significatif à plus de 95% pour les voyages et de 90% pour les compostages. Cela signifie que l'augmentation du nombre de tranches horaires en janvier 1985 aurait permis d'accroître le trafic mensuel moyen de 294 597 voyageurs environ. Ceci prouve l'effet important de la qualité de service sur la fréquentation du métro.

Nous avons représenté sur le graphique en annexe, à côté des chiffres réels (courbes en traits pleins), ceux fournis par l'application des modèles 3 et 6 du tableau 1 (courbes en pointillés).

On peut vérifier que nos modèles conduisent à de bons ajustements des données estimées aux valeurs observées.

#### Prévisions de trafic

Moyennant certaines précautions, les modèles ci-dessus peuvent servir d'instrument de prévision du trafic. C'est un des intérêts, et non des moindres, de l'analyse précédente. Ainsi, en utilisant les modèles 3 et 6 du tableau 1, qui correspondent aux meilleurs ajustements, on obtiendrait, pour les mois de juillet à septembre, à offre constante, les résultats ci-dessous (tableau 2).

Les chiffres du tableau 2 indiquent les limites inférieures et supérieures des intervalles dans lesquels, selon nos modèles, les valeurs vraies ont 95 chances sur 100 de se trouver. Ainsi, au mois de octobre 1986, le nombre réel de compostages devrait se trouver compris entre 924 096 et 1 127 952 et le nombre réel de voyageurs entre 2 212 047 et 3 058 707. Les valeurs prévues représentent les chiffres obtenus en appliquant les coefficients des modèles 3 et 6. Ce sont les valeurs centrales des intervalles de prévision.

Pour vérifier la justesse de notre analyse, nous ne possédons, pour le moment (6), que les chiffres réels des mois d'octobre et novembre 1986. Ils s'élèvent respectivement à 1 036 150 et 928 034 pour les compostages et 2 674 900 et 2 732 169 pour les voyages. On peut constater, dans tous les cas, que non seulement ils se trouvent dans les limites des intervalles définis précédemment mais qu'ils ne sont pas très éloignés des valeurs prévues.

Ceci confirme que les modèles économétriques utilisés dans cette étude constituent une bonne approximation de l'évolution de la fréquentation du métro de Lille depuis son ouverture (7).

(6) En janvier 1987.

(7) Des résultats très satisfaisants avaient déjà été obtenus dans une première étude parue récemment. Voir S. Dormard et O. Heddebaud, «La fréquentation du métro de Lille, trois ans après», Cahiers Lillois d'Economie et de Sociologie, n° 8, 2<sup>e</sup> semestre 1986, pp. 39-49.

**Tableau 2: Prévisions de trafic (1986)  
(intervalles de confiance à 95%)**

	Octobre	Novembre	Décembre
<b>COMPOSTAGES</b>			
Valeur inférieure.....	924 096	847 006	853 503
Valeur prévue.....	1 026 024	948 934	955 431
Valeur supérieure.....	1 127 952	1 050 862	1 057 359
<b>VOYAGEURS</b>			
Valeur inférieure.....	2 212 047	2 184 466	1 955 590
Valeur prévue.....	2 635 377	2 607 796	2 378 920
Valeur supérieure.....	3 058 707	3 031 126	2 802 250

# Conclusion

Il serait absurde de croire que l'analyse économétrique peut expliquer en totalité un phénomène soci-économique aussi complexe que les transports collectifs de voyageurs dans une agglomération urbaine de la taille de celle de Lille. Néanmoins, quelques relations significatives ont pu être dégagées permettant une meilleure compréhension du problème et ouvrant la possibilité d'une action des pouvoirs publics.

1. Nous avons noté l'absence de croissance temporelle du flux de voyageurs du VAL. Le nouveau moyen de transport offert aux habitants de l'agglomération lilloise a rapidement attiré ses usagers potentiels et seule une extension du réseau a pu augmenter sensiblement le trafic total (variable offre). Il en sera probablement de même lors des ouvertures des lignes futures.

2. La tarification ne semble jouer qu'un rôle mineur dans l'évolution du nombre d'usagers. Si le coût d'un voyage unique paraît assez élevé, l'utilisation de cartes hebdomadaires ou mensuelles ramène le prix du transport à un niveau raisonnable. De plus, en 3 ans, il a peu augmenté en valeur réelle. Ceci ne signifie pas que la demande de transport collectif est inélastique au prix. D'autres variables, notamment le coût du transport individuel, interviennent et devraient être prises en compte pour estimer l'impact de modifications sensibles du mode de tarification.

3. Autre constatation, le trafic du métro de Lille fait l'objet d'importantes fluctuations mensuelles. Certaines d'entre elles peuvent être aisément expliquées. Les creux de juillet et août correspondent à la période des vacances, les accroissements de septembre et octobre, aux rentrées scolaire et universitaire. Pour les autres mois, l'interprétation apparaît moins facile, d'autant plus qu'on observe parfois des évolutions différentes

entre les compostages et les voyages. Le mois de décembre, par exemple, est marqué par une forte baisse relative du nombre de voyageurs par rapport au mois de novembre, alors que le nombre de compostages progresse légèrement. Les vacances scolaires, mais aussi les déplacements liés aux fêtes de fin d'année, expliquent très certainement l'essentiel de ce phénomène.

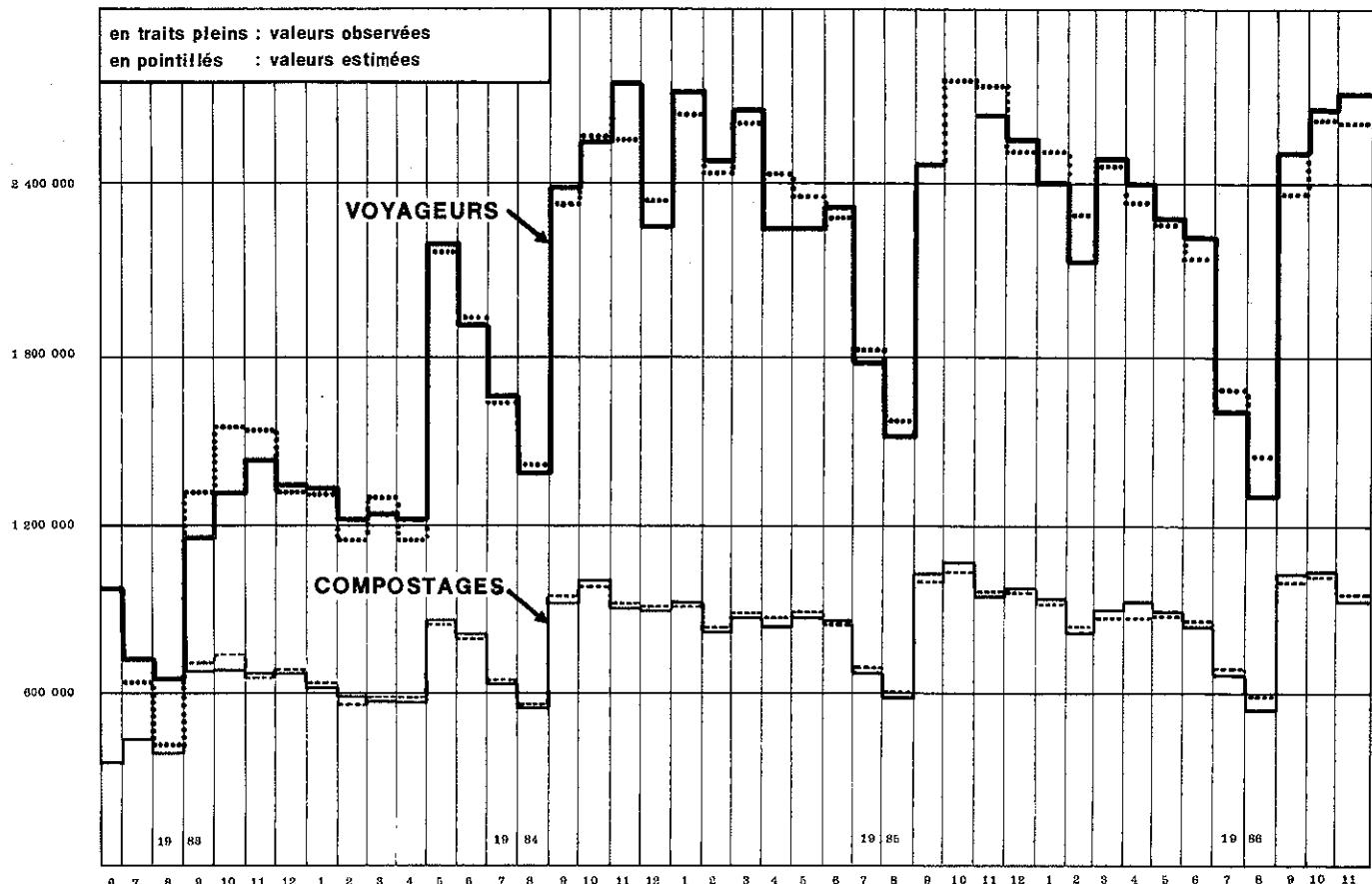
Le chiffre négatif obtenu pour le mois de février dans le cas des compostages résulte d'un nombre de jours d'exploitation plus faible, 28 ou 29 jours contre 30 ou 31 pour les autres mois. Si on rectifie ce nombre de jours, on obtient un coefficient positif, du même ordre que ceux des mois d'avril et mai.

4. Nous avons noté aussi l'effet positif sur le nombre d'usagers d'une amélioration du confort des voyageurs due à un meilleur ajustement, au cours de la journée, de l'offre à la demande. Précisons que c'est grâce à l'automatisation totale du métro qu'une adaptation continue, rapide et peu coûteuse de l'offre de transport apparaît possible, ce qui justifie ainsi les choix effectués dans ce domaine par les responsables du VAL.

L'étude économétrique ci-dessus confirme donc les résultats de la seconde enquête socio-économique réalisée en 1983-1984 (8). Celle-ci avait montré, sur la base d'interviews à domicile, qu'un grand nombre d'usagers ayant renoncé à leur voiture individuelle et utilisant le métro, étaient plus sensibles à la qualité du service offert qu'à la tarification ou à un éventuel gain de temps.

(8) Voir O. Heddebaud-Gabillard, ouv. cité.

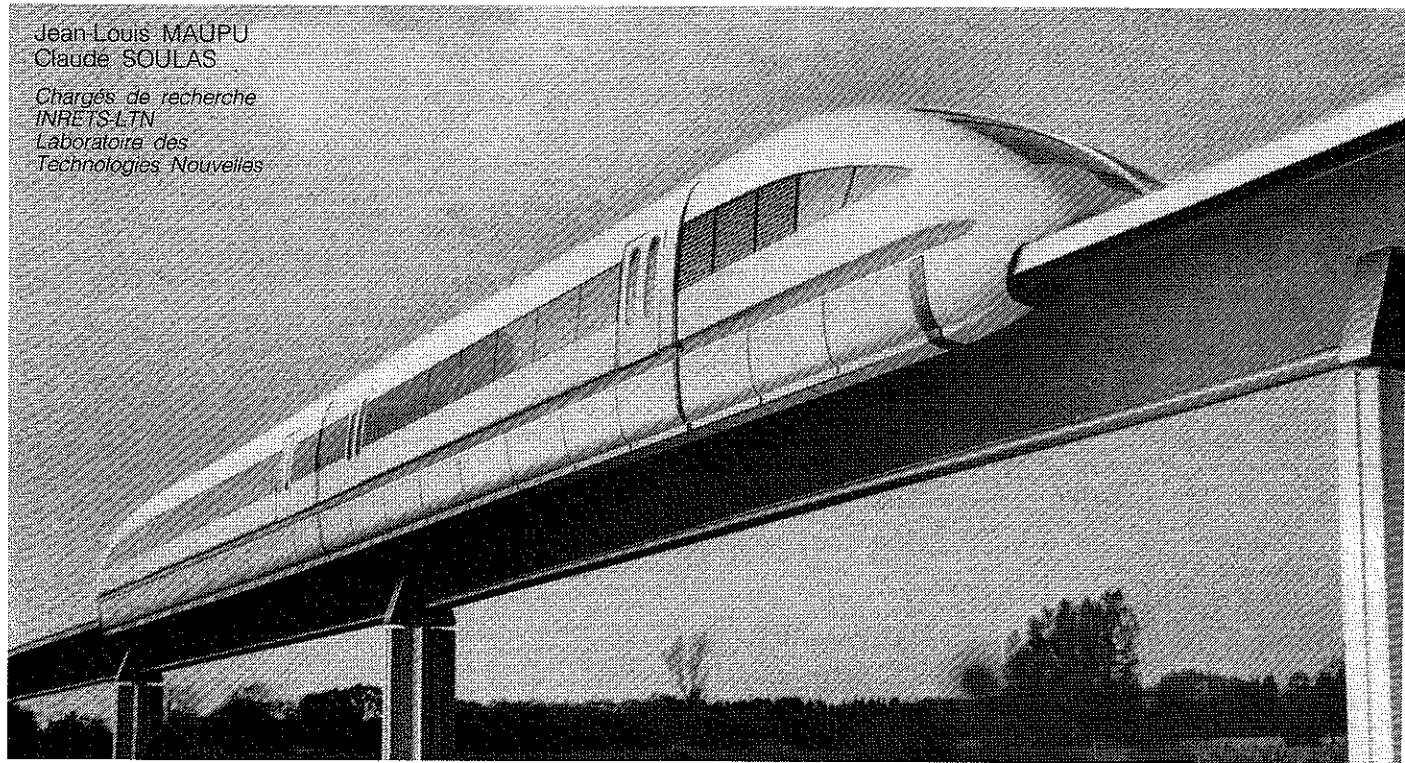
## COMPOSTAGES ET VOYAGEURS



# Système suburbain à moteur linéaire Coopération franco-allemande

Jean-Louis MAUPU  
Claude SOULAS

Chargés de recherche  
INRETS/LTN  
Laboratoire des  
Technologies Nouvelles



Dans le cadre d'une coopération franco-allemande, des industriels français et allemands ont engagé avec l'aide d'organismes publics l'étude d'un système suburbain propulsé par un moteur linéaire à induit en U. Ces travaux sont le prolongement d'études et d'essais réalisés ces dernières années à l'INRETS sur ce type de motorisation, et la poursuite, au niveau système, d'une coopération franco-allemande qui avait jusqu'alors surtout porté ses fruits au niveau des composants (traction et guidage). Matra Transport chef de file de la partie française et Thyssen-Henschel chef de file de la partie allemande commencent ainsi à définir en coopération avec leurs partenaires nationaux, un moyen de transport qui, avec une vitesse maximale de 150 km/h devrait être surtout adapté à certains types de dessertes suburbaines.

## La coopération franco-allemande

La République Fédérale Allemande a engagé un programme important de développement des systèmes de transport à sustentation magnétique. D'un autre côté en France le domaine des grandes vitesses a surtout été marqué par la mise en service du TGV, mais depuis l'abandon de la filière aérotrain des travaux ont été poursuivis sur les moteurs linéaires de traction adaptés aux grandes vitesses, notamment sous l'impulsion de l'INRETS. Un rapprochement a eu lieu et en 1978 un accord de coopération a été conclu entre le ministère des Transports français et le BMFT allemand, c'est-à-dire le Ministère Fédéral de la Recherche et de la Technologie. Cet accord s'est concrétisé par un certain nombre d'annexes qui ont pour objet soit la comparaison technico-économique de systèmes de transport terrestre, soit l'étude de composants (motorisation linéaire, guidage par électro-aimants, aérodynamisme), soit des travaux divers (dictionnaire technique des transports à grande vitesse).

Le projet que nous décrivons dans cet article s'inscrit dans le cadre d'une nouvelle annexe, l'annexe J, et c'est pour des raisons de choix de créneaux qu'il ne concerne pas les grandes vitesses au sens interurbain du terme (300 à 400 km/h) mais

au contraire les liaisons suburbaines rapides (de l'ordre de 150 km/h). Le projet global comprend les phases de définition, construction et essais du système de transport; actuellement seule la première phase est lancée. Il s'agit d'examiner les cas d'application possibles, de préciser les spécifications du système, d'en faire les études techniques et le dimensionnement, d'analyser du point de vue technico-économique les solutions envisagées. Il est prévu d'étudier deux versions, l'une utilisant la sustentation magnétique et le guidage magnétique, l'autre la sustentation par roues ferrées et le guidage magnétique. En tout état de cause ces deux versions ont en commun le principe de traction reposant sur le moteur linéaire à induit en U.

Les industriels chefs de file, Matra Transport du côté français et Thyssen Henschel du côté allemand ont signé un accord industriel précisant le partage des tâches, et ont chacun obtenu un subventionnement de la part de leurs ministères. Du côté français, la société Celduc a en charge la motorisation. L'INRETS, la RATP et SOFRETU participent aux travaux, ainsi que du côté allemand Dornier System (expert sous contrat du Ministère Allemand).

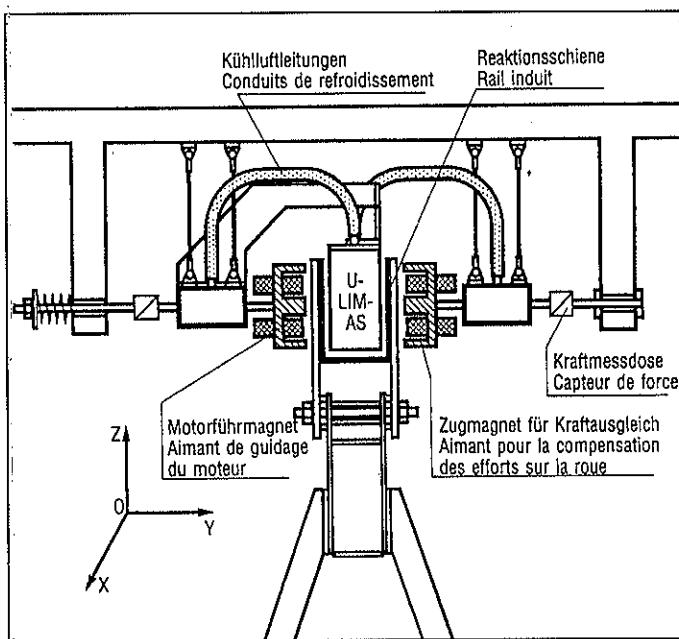
## Le moteur linéaire et le principe U-LIM-AS

L'intérêt du moteur linéaire est évident lorsqu'il s'agit d'entraîner un véhicule n'ayant pas de contact avec le sol comme par exemple le véhicule à sustentation magnétique. Même pour un véhicule à roues ce type de propulsion présente un certain nombre d'avantages:

- On peut s'affranchir des contraintes liées à l'adhérence roue/rail, ce qui est sensible dans les pentes ou en cas d'intempéries notamment en cas de pilotage automatique.
  - Il est possible, si nécessaire, d'abaisser le plancher.
  - La suppression de la transmission a un impact favorable sur le bruit.

En contrepartie les moteurs linéaires ont l'inconvénient bien connu d'un moins bon facteur de puissance qui augmente le courant appelé et oblige à surdimensionner l'électronique de puissance (l'onduleur). Toutefois cet inconvénient a été notablement réduit grâce à l'invention, par M. Guimbal, d'un moteur linéaire à induit en U ayant un meilleur facteur de puissance que les moteurs plats. Les essais réalisés en 1976 à l'échelle 1/3 par l'INRETS au laboratoire de Vitry avaient déjà montré que ce type de moteur avait un facteur de puissance supérieur à 0,7 et n'induisait pas de forces parasites transversales notables. Ensuite, un programme de calcul a été mis au point, et un prototype, vraie grandeur cette fois, construit par la société Celduc, a été essayé sur la roue de Grenoble en 1979 à la vitesse de 200 km/h avec une puissance de 1 MW.

Suite à ces premiers résultats encourageants il a été possible de passer au programme U-LIM-AS dans le cadre de la coopération franco-allemande. Cette expression traduit le fait qu'il s'agit d'un moteur linéaire asynchrone à induit en U (U-Linear Induction Moteur-Asynchronous). Le moteur linéaire en U, qui offre de meilleures caractéristiques électriques que le moteur plat, permet aussi, en contrepartie d'un induit de réalisation un peu plus compliquée, d'utiliser les deux flancs externes du U pour le guidage latéral à l'aide d'électroaimants. Dans le cadre de ce programme un module de propulsion guidage de 1 MW alimenté par un onduleur à thyristor de type PWM a été construit et essayé sur la roue de Grenoble en 1983 et 1984 à la vitesse de 300 km/h. Les performances attendues ont été confirmées et la stabilité des entrefers du moteur a été démontrée. Du composant moteur on passait ainsi à un sous-ensemble d'un système de transport et avec le projet de l'annexe J il s'agit maintenant de définir un système de transport complet.



Principe du moteur ULIM AS essayé à Grenoble

## Le cahier des charges

Le créneau visé détermine un certain nombre de caractéristiques. Certains matériels existants du type RER ou train de banlieue possèdent déjà une vitesse de pointe de l'ordre de 120 à 150 km/h, d'autres matériels plus spécifiquement urbains peuvent prendre des courbes de 30 mètres de rayon. La spécificité du nouveau matériel suburbain étudié doit être de réunir ces deux caractéristiques pour pouvoir à la fois desservir des interstations longues de 3 à 10 km avec une bonne vitesse commerciale et ensuite venir s'insérer dans des zones difficiles comme les aéroports ou les centres urbains qui imposent souvent un tracé sinueux. De même, pour garantir une facilité d'insertion, des pentes maximales de 10% sont envisagées. L'accélération nominale lors du démarrage, et jusqu'à la vitesse de définition, devra être de l'ordre de 1,3 m/s<sup>2</sup>, du moins sur les tronçons relativement plats.

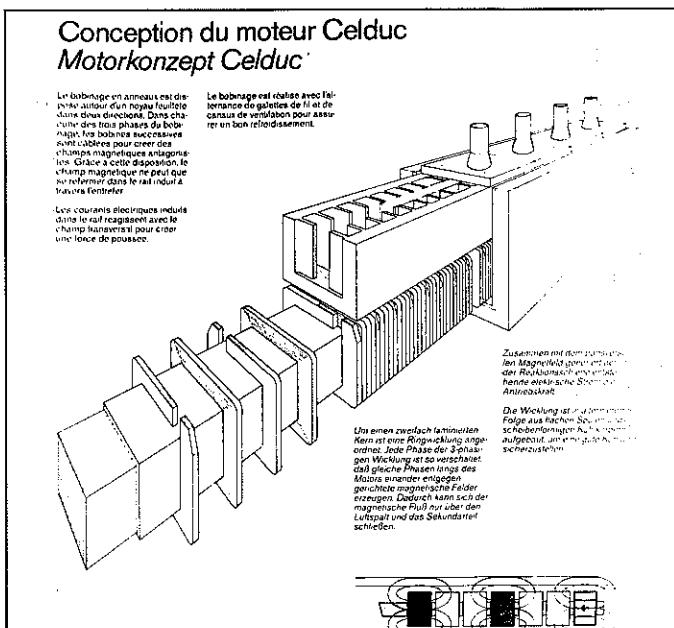
### Caractéristiques visées du système suburbain

• vitesse maximale . . . . .	150 km/h
• rayon de courbure (à faible vitesse) . . . . .	30 m
• période . . . . .	1 mn
• pente maximale . . . . .	10%
• accélération en palier . . . . .	1,3 m/s <sup>2</sup>

Le système sera conçu en automatisme intégral, sans conducteur à bord, ce qui veut dire aussi que les rames seront de capacité limitée et circuleront à une cadence élevée, il est escompté une période de l'ordre de la minute. Les rames seront découplables afin de faire varier leur longueur en fonction de l'heure de la journée et la demande de transport. La plus petite unité indissociable sera de deux voitures, car, pour des raisons de redondance d'équipement, il n'est pas a priori prévu de faire circuler des voitures isolées. Chaque voiture ou véhicule aura une longueur totale de l'ordre de 12 à 15 m et une largeur de 2,60 m en version de base.

L'association de toutes ces caractéristiques, résumées dans le tableau ci-dessus, dans un même système de transport est relativement ambitieuse, chacune des deux solutions technologiques envisagées devra coller autant que possible à ce cahier des charges sans toutefois atteindre un coût trop important en investissement ou en exploitation.

D'autres caractéristiques comme par exemple la climatisation



Conception du moteur CELDUC

seront imposées par le fait qu'une partie du marché se situe à l'exportation. Une attention particulière devra être portée à la réduction du bruit.

Le cas le plus typique pour ce système suburbain est la circulation des véhicules sur voies aériennes, la circulation en souterrain devra quand même être étudiée car elle pourrait être envisagée sur de plus faibles longueurs dans des zones particulièrement encombrées.

## La sustentation magnétique

Le principe de la sustentation magnétique — des électroaimants servant à supporter le véhicule et d'autres à assurer son guidage — sera dérivé du principe déjà utilisé pour le véhicule Transrapid conçu pour les grandes vitesses et essayé en Allemagne à grande échelle sur le polygone d'Emsland. Il faut quand même signaler une différence qui aura trait à la motorisation: pour Transrapid cette motorisation est dite à stator long, il s'agit d'une voie «active», bobinée sur toute sa longueur, qui constitue la partie primaire du moteur linéaire, l'induit se trouvant sur le véhicule. Pour le système suburbain de l'annexe J, U-LIM-AS déjà évoqué, il s'agit au contraire d'un stator court, c'est-à-dire que l'inducteur du moteur linéaire se trouve sur le véhicule, et l'induit — en l'occurrence l'induit en U — est disposé tout le long de la voie.

Le principe sera a fortiori également différent de celui du système urbain allemand M-Bahn en construction à Berlin qui utilise aussi le stator long ou voie active en liaison avec des aimants permanents servant à la fois comme organes de sustentation et organes de réaction pour la motorisation.

L'une des solutions envisagées pour la réalisation des rames prévoit des motrices relativement courtes (de l'ordre de 3 à 4 mètres) comprenant tous les équipements de traction et de commande, encadrant des unités voyageurs composées de deux caisses de 10 à 12 mètres. Afin de simplifier la réalisation des aiguillages, les véhicules pourraient être équipés de roues mais celles-ci ne viendraient en contact que dans les zones d'aiguillages.

## La version à roues et guidage magnétique

L'INPRETS a proposé une solution pour la version à roues ferrées que nous allons décrire succinctement ci-après.

Le principe par lequel fonctionne habituellement le guidage d'un essieu ferroviaire est bien connu: les deux roues d'un même essieu sont solidaires en rotation et ont des tables de roulement coniques avec les sommets des cônes reportés sur l'axe de l'essieu, à l'extérieur de la voie; lorsque l'essieu est centré dans la voie, les deux cercles de roulement ont un même diamètre et le roulement s'effectue en ligne droite sans glissement; si l'essieu s'écarte du centre de la voie, sous l'effet d'une sollicitation extérieure ou par l'apparition d'une courbe de la voie, le rayon du cercle de roulement augmente du côté dont l'essieu s'est rapproché (extérieur de la courbe) tandis qu'il diminue de l'autre côté. Le chemin parcouru par la roue «extérieure» est alors plus grand que celui de la roue «intérieure» et l'essieu tend donc à «s'orienter», c'est-à-dire à pivoter autour de son centre, pour que celui-ci se rapproche à nouveau du centre de la voie.

Ce mécanisme donne à un essieu isolé une avance oscillante, en canard, instable. Pour la stabiliser, les essieux sont toujours assemblés par deux (wagons à essieux ou bogies) par l'intermédiaire de moyens élastiques de rappel des boîtes d'essieu dont les raideurs sont plus ou moins importantes.

La double contrainte d'un faible rayon de courbure et d'une vitesse de croisière relativement élevée incite à choisir un nouveau type de roulement. En effet, avec les bogies traditionnels, l'aptitude à prendre les courbes serrées est guère compatible avec des caractéristiques (empattement, raideur, conicité des roues...) permettant de garantir une bonne stabilité à vitesse élevée, et il est difficile d'éliminer bruit et usure sur les parcours très sinués.

La solution du bogie à essieux orientables et forte conicité utilisée sur le matériel canadien ALRT en service à Vancouver ne résoudrait pas tous les problèmes, c'est donc la solution des essieux orientables à roues indépendantes qui a été retenue. Cette configuration est la mieux adaptée pour le guidage

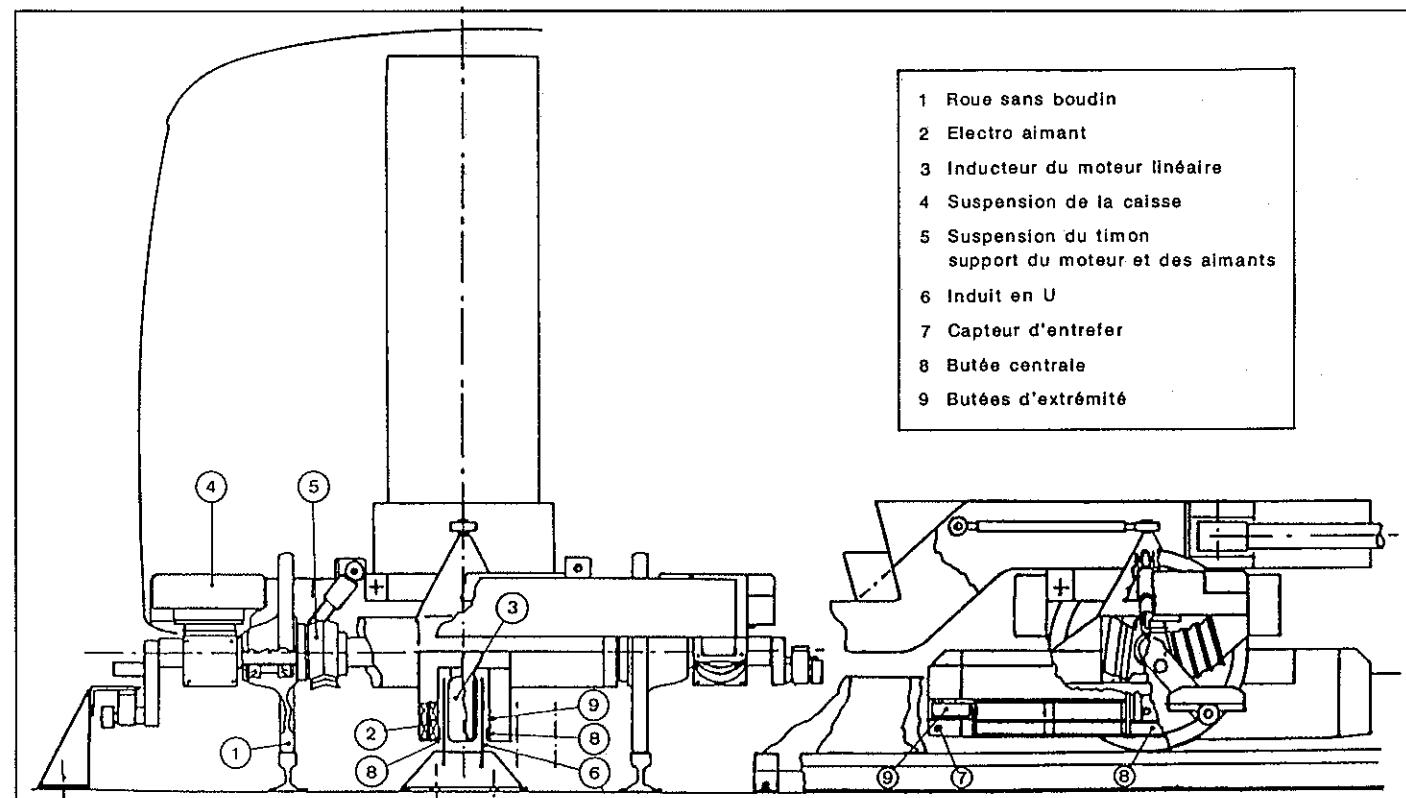


Schéma d'un mode de réalisation possible du véhicule à essieux orientables magnétiquement

par rapport au rail d'induit en U, elle va de pair avec le choix de caisses relativement courtes, d'une longueur de l'ordre de 12 m. Une solution comparable avait déjà été testée par la RATP pour le métro BOA (voir article dans ce même numéro) mais avec un principe différent pour l'orientation des essieux. Ici, l'originalité de la solution proposée réside dans le fait qu'une orientation correcte de l'essieu est garantie dans toutes les configurations de courbes par l'intermédiaire d'un dispositif électromagnétique solidaire d'un timon lié rigidement à l'essieu et prenant référence sur un rail de même courbure que la voie, en l'occurrence le rail d'induit en U du moteur linéaire. Il en découle que:

- Les rames peuvent être réversibles.
- Le procédé s'applique aussi à l'essieu de tête.
- Il fonctionne localement même dans les entrées et sorties de courbe.
- La précision du guidage est compatible avec les faibles entrefers souhaitables pour le moteur linéaire (de l'ordre d'une dizaine de millimètres) qui peut alors être fixé sur le même timon que les aimants.

Ainsi chaque essieu est équipé d'un inducteur de moteur linéaire de longueur limitée (1,5 m pour pouvoir prendre les courbes de 30 mètres) se déplaçant à l'intérieur de l'induit en U, et d'électroaimants agissant sur l'extérieur de ce U. Contrairement à la sustentation magnétique les aimants ne sont pas dimensionnés pour reprendre la totalité des efforts latéraux, mais uniquement les efforts d'orientation de l'essieu. Une fois le pilotage de l'orientation de l'essieu assuré, le guidage latéral découle du fait que selon les lois du roulement, un essieu qui se déplace avec un angle de dérive  $\alpha$  subit une force de rappel transversale proportionnelle à l'angle  $\alpha$  et à la vitesse réduite de dérive, ceci tant que la limite d'adhérence n'est pas atteinte. Du fait de la bonne orientation de l'essieu en toute circonstance et du fait que l'adhérence roue/rail sert uniquement au guidage et n'est pas sollicitée par des forces longitudinales de traction freinage et orientation de l'essieu, c'est seulement pour des circonstances exceptionnelles (rafales de vent violentes, perte momentanée d'adhérence) que des butées sont nécessaires, celles-ci sont assurées par d'autres moyens que le boudin des roues ferroviaires traditionnelles car le débattement latéral trop important ne serait pas compatible avec la bonne précision nécessaire pour l'entrefer du moteur linéaire. Par ailleurs la conicité des roues (tables de roulement habituellement inclinées au 1/20<sup>e</sup> ou 1/40<sup>e</sup>) qui n'est plus nécessaire du fait de l'orientation magnétique et de l'indépendance des roues et qui serait plutôt gênante dans les aiguillages est supprimée. Les roues ferroviaires utilisées sont donc à la fois plates (ou légèrement bombées) et sans boudins.

En remplacement des boudins, d'autres types de butées sont prévus, elles ne devraient venir en contact que de manière exceptionnelle. Celles-ci agissent sur l'extérieur du rail en U, qui a ainsi une troisième fonction (après la fonction traction et la fonction référence du guidage) et peut, le cas échéant, être graissé pour cet usage. Des butées centrales limitent les translations latérales et des butées d'extrémités limitent l'angle de rotation. Ces dernières, en retrait par rapport aux butées centrales, sont fixées aux extrémités du timon-support du moteur, de même que les aimants, et sont éventuellement incorporées à ces derniers.

Pour assurer l'asservissement en position trois capteurs mesurent les entrefers au centre et aux extrémités. L'asservissement est conçu de telle sorte qu'en alignement droit on cherche à ce que ces trois entrefers aient la même valeur. En courbe les entrefers d'extrémité ne peuvent pas être égaux à l'entrefer central, mais on cherche à ce que ceux-ci soient égaux entre eux. La mesure des entrefers peut être effectuée par des procédés identiques à ceux utilisés pour le positionnement des aimants de guidage dans le cas de la sustentation magnétique, mais il peut être nécessaire d'avoir une autre boucle d'asservissement dont la valeur de consigne est un angle proportionnel au déport latéral de l'essieu.

## Essais

Le principe du guidage magnétique d'un véhicule ferroviaire constitue une innovation, même s'il utilise des composants connus (électroaimants, mesure d'entrefer). Aussi a-t-il été jugé utile de réaliser un essai en modèle réduit à l'échelle 1/4 sur la roue de Grenoble. Cette grande roue de 13 mètres de diamètre a été conçue pour les essais de moteur linéaire mais, depuis 1975 il était prévu de l'utiliser également pour des essais de roulement roue/rail et pneumatique/chaussée. L'INRETS qui après la similitude électromagnétique a mis au point la similitude mécanique des bogies, a ainsi déjà effectué les essais du bogie marchandise Y 25, et se prépare maintenant à réaliser, en coopération avec la RATP, les essais d'une maquette de l'essieu guidé magnétiquement. Il s'agit de vérifier le principe de la stabilité du guidage et les ordres de grandeur des efforts de guidage utiles sur rails secs puis mouillés, ceci sans prendre en compte les butées. La RATP prend en charge la réalisation de la maquette à échelle 1/4 et l'INRETS la conception de la régulation.

## Aiguillage

La mise au point d'un nouveau type d'aiguillage est nécessaire. Le fait de placer le rail en U au-dessus du plan de roulement permet d'éviter les lacunes dans les rails de roulement. L'une des solutions les plus plausibles consisterait à réaliser une plaque pivotante portant deux tronçons de rail en U, l'un pour la voie droite, l'autre pour la voie déviée.

## Les composants communs

Un certain nombre de composants pourront être similaires dans la version tout magnétique et la version à roues: la caisse, le moteur linéaire, son rail en U, l'onduleur, la captation de courant, les électroaimants et leur régulation, le pilotage automatique, les sécurités, les automatismes de surveillance et de régulation de la marche des véhicules.

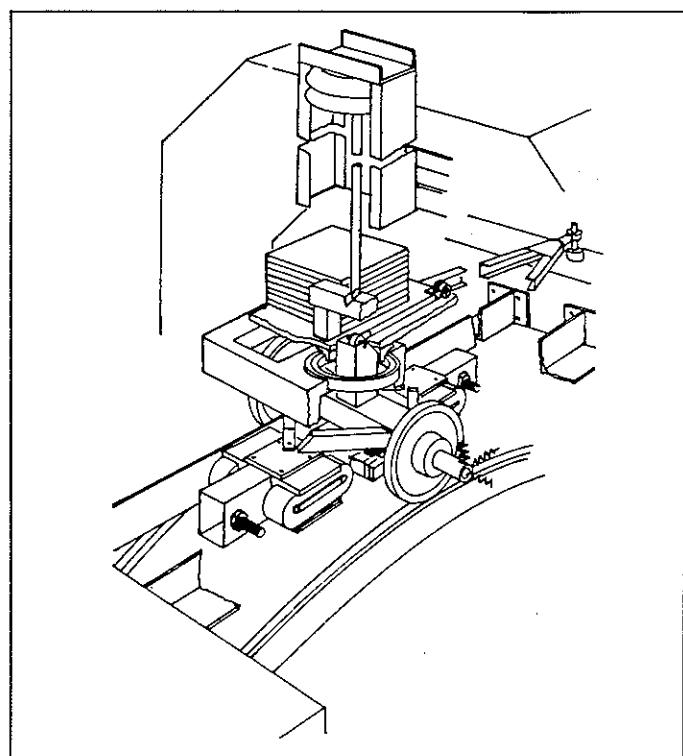
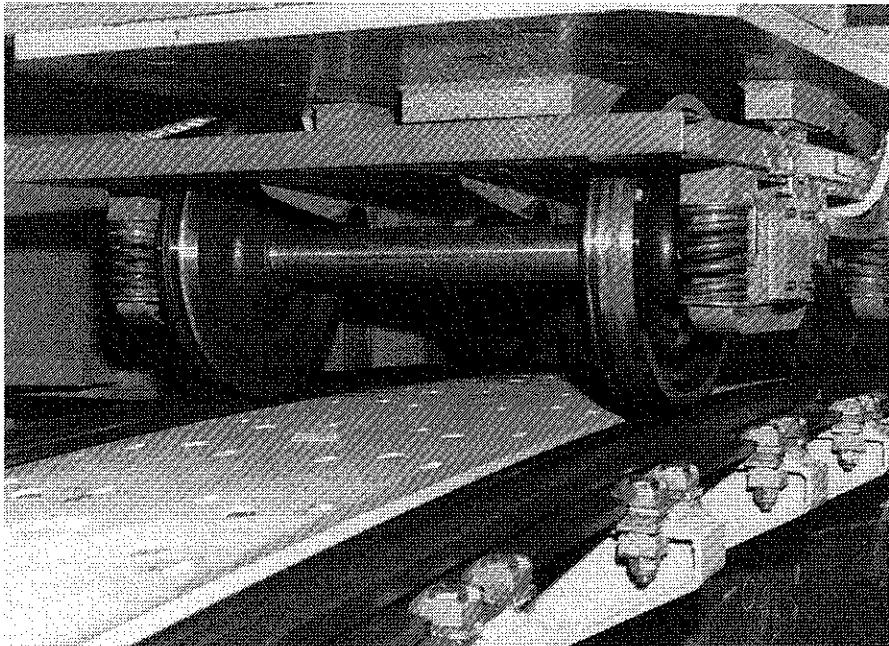


Schéma de l'essai d'une maquette de l'essieu orientable magnétiquement (prévu sur la roue de Grenoble)

**Essai de bogie  
à échelle réduite  
sur la roue  
de Grenoble**



Le même moteur linéaire peut être utilisé, disposé sur chacun des essieux pour la version à roues, et le cas échéant assemblé en plusieurs tronçons articulés pour la version tout magnétique. Une ventilation forcée est nécessaire. Le moteur linéaire permet également de réaliser un freinage indépendant de l'adhérence roue-rail, freinage récupératif hypersynchrone auquel se substitue un freinage à contre courant à basse vitesse pour les situations normales, et freinage de sécurité en injectant du courant continu dans l'inducteur du moteur linéaire à partir de batteries embarquées. En tout état de cause un complément de freinage mécanique est nécessaire mais uniquement pour les très faibles vitesses et pour garantir l'immobilisation du véhicule à l'arrêt. Parmi les solutions envisagées pour ce complément mécanique figure le freinage sur le rail en U qui aurait ainsi, une quatrième fonction.

Le rail en U sera constitué d'un sandwich acier-cuivre, d'épaisseur 20 à 25 mm pour l'acier, 2 à 3 mm pour le cuivre. Afin de faciliter la prise des courbes à faible rayon par le moteur, la largeur intérieure du U pourrait être localement augmentée par réduction de l'épaisseur des flans, ce qui — du moins pour la version à roues avec un moteur par essieu — devrait permettre d'éviter le recours à des moteurs articulés.

La captation s'effectuera en 750 V ou 1 500 V continu, au stade actuel de l'étude la captation par troisième rail apparaît préférable à la captation par pantographe et caténaire.

Les automatismes de commande et de sécurité seront dérivés de ceux déjà développés ou en cours de développement pour des systèmes comme VAL ou ARAMIS.

## Conclusion

La première phase d'un projet franco-allemand relativement ambitieux a été lancée. Le système de transport étudié repose sur des composants dont aucun ne pose de difficultés particulières mais leur association est originale. De même, au niveau des performances, le système suburbain automatique à moteur linéaire devra présenter des caractéristiques qui n'ont encore jamais été réunies toutes ensemble. La phase actuelle doit permettre de faire un dimensionnement des divers sous-ensembles, et de montrer dans quelle mesure chacune des deux versions étudiées peut s'avérer compétitive au plan technico-économique.

### Exemples d'application de divers types de motorisation

	Moteur à courant continu	Moteur à réductance variable	Moteur asynchrone	Moteur synchrone
Moteurs rotatifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transports ferroviaires classiques</li> <li>Métros</li> <li>Tramways</li> <li>VAL</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ARAMIS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Motrices prototypes RATP</li> <li>Expérimentations allemandes sur matériel urbain</li> <li>Quelques locomotives</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TGV Atlantique</li> <li>Locomotive Sybic</li> </ul>
Moteur linéaire stator court			<ul style="list-style-type: none"> <li>U-LIM-AS</li> <li>Annexe J</li> <li>Skytrain de Vancouver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>induit en U</li> <li>induit plat</li> </ul>
Moteur linéaire stator long (voie active)			<ul style="list-style-type: none"> <li>Wedway</li> <li>Principe Télébus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transrapid (prototype à Emsland)</li> <li>M-Bahn</li> </ul>

# Le système ARAMIS et l'expérimentation en cours

Maurice SALOIN

Chef de projet

MATRA TRANSPORTS

Les essais du système ARAMIS ont débuté en juin 1986 sur le Centre d'Expérimentation Technique du boulevard Victor à Paris. Les premiers tours en mode automatique se sont déroulés en décembre 1986.

ARAMIS est un système de transport en commun en site propre entièrement automatisé dont les caractéristiques permettent:

- une légèreté de l'infrastructure induisant une meilleure facilité d'insertion et des coûts de génie civil comparativement moins élevés que pour les systèmes à gabarit plus important,
- une haute qualité de service, notamment un faible temps d'attente et une absence de rupture de charge entre les différentes branches d'un réseau.

Les véhicules de petit gabarit, groupés par deux, sont autonomes, à traction électrique, à roulement sur pneumatiques et de petite capacité: dix personnes par véhicule, toutes assises, soit donc vingt personnes par unité double appelée doublet. Ces doublets circulent en rames, par l'intermédiaire d'un accouplement électrique autorisant leurs séparations et leurs regroupements aux aiguillages. L'orientation de chaque doublet est assurée par un dispositif d'aiguillage embarqué. Ainsi il est possible de réaliser un réseau avec antennes sans que les voyageurs aient à subir de rupture de charge, étant donné que, dans une même rame, les destinations de chaque doublet peuvent être différentes.

Un avantage fondamental de l'automatisme intégral et de la souplesse d'exploitation du système est l'adaptation de la capacité de transport à la demande. Compte tenu du faible intervalle de passage des rames, il est possible d'offrir aux heures de pointe plus de 11 000 places par heure et par sens. Les rames sont alors constituées de sept doublets, la longueur des quais de stations étant de 63 m.

Outre les fonctions réalisées par l'automatisme intégral sur un métro type VAL et les objectifs qui leur sont assignés: sécurité, fiabilité opérationnelle, disponibilité, capacité de reconfiguration, etc., les spécifications fixées au système ARAMIS induisent des contraintes particulières:

- les séquences de rendez-vous, séparations, regroupement, à vitesse non nulle, marche en rame sans attelage mécanique, ni, bien entendu, de lignes de trains électriques, font appel à des concepts originaux tant dans le domaine des automatismes fonctionnels qu'en matière de sécurité,
- le petit gabarit et la capacité réduite de chaque unité de transport autonome imposent un effort particulier d'optimisation d'encombrement, de masse, et de coût des équipements.

Sur le plan technologique l'utilisation de la microinformatique, non seulement pour les fonctions de pilotage comme pour le VAL, mais également pour les fonctions sécuritaires devraient permettre de répondre à ces différents objectifs. Les principes de sécurité retenus pour les microprocesseurs sont dérivés du système SACEM (système d'aide à la conduite, à l'exploitation et à la maintenance mis en œuvre sur la ligne A du RER). Par ailleurs on notera le développement d'un système de propulsion par moteurs à réductance variable en liaison directe avec les roues motrices (1 moteur par roue, 1 essieu moteur par véhicule) et enfin l'adoption de transmissions hyperfréquences à haut débit pour les communications entre doublets durant les phases de rendez-vous regroupement et marche en rame. Des dispositions particulières ont été prises pour le développement d'un dispositif d'aide à la maintenance intégré.

Les évolutions technologiques aidant, notamment la mise en œuvre des microprocesseurs, les automatismes d'ARAMIS sont conçus pour assurer sur le plan économique une grande souplesse d'exploitation et des coûts de maintenance réduits.



Formation en rame de deux doublets au Centre d'Expérimentation Technique (CET)

## Le centre d'expérimentation technique

A la suite d'enquêtes en région d'Ile-de-France et dans plusieurs agglomérations de plus de 200 000 habitants qui ont donné des résultats encourageants, un protocole d'accord a été signé le 16 juillet 1984 entre le ministère des Transports, la région d'Ile-de-France, la RATP et MATRA, pour la création et l'utilisation d'un Centre d'expérimentation technique à Paris (15°) du système ARAMIS. Cet accord marque le lancement de la première réalisation nouvelle dans le domaine des transports collectifs prévue au contrat de plan passé entre l'état de la région d'Ile-de-France le 17 avril 1984.

Le Centre d'expérimentation technique (CET) est implanté sur une partie des emprises SNCF de la Petite Ceinture, au Sud de Paris, le long du boulevard Victor, à proximité immédiate de la gare du Boulevard Victor de la ligne C du RER. Cette implantation a l'avantage de permettre une réutilisation partielle des infrastructures et leur intégration dans une ligne commerciale en projet qui pourrait relier Bercy à Javel.

Les principaux constituants du Centre sont les suivants:

- une boucle simple de 1 000 m et une voie en dérivation de 600 m,
- une station couverte de 45 m de long,
- un atelier,
- une sous-station d'alimentation électrique,
- cinq doublets,
- un poste central de commande.

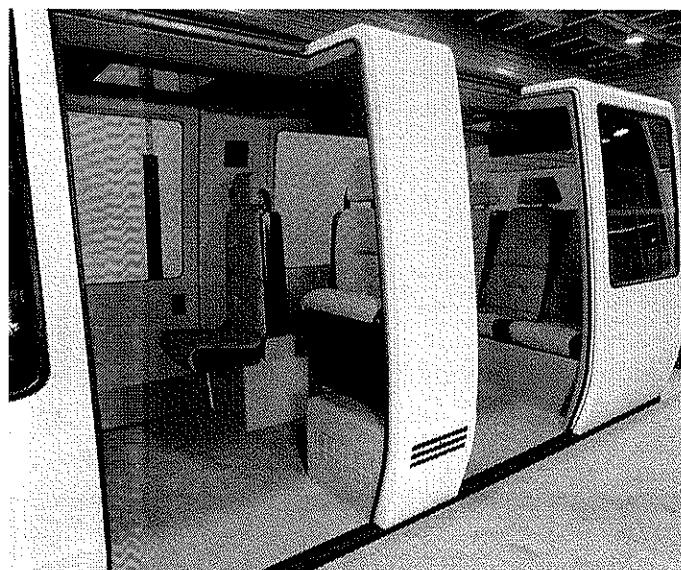
Le CET doit conduire à la qualification technique du système en permettant de tester ou d'évaluer:

- les fonctions originales: marche en rames, séparation des véhicules au niveau des aiguillages divergents, regroupement des véhicules d'une rame, rendez-vous entre deux rames, caisson mobile déformable,
- la gestion du parc des véhicules en services normal et perturbé,
- les procédures de maintenance du matériel roulant et des installations fixes,
- la fiabilité et la disponibilité,
- l'exploitabilité du système.

Les équipements réalisés sur le CET notamment le matériel roulant et les automatismes doivent être en version prototype définitive et industrialisable.

Par ailleurs, à l'issue du programme les coûts d'investissement des équipements spécifiques ARAMIS pour une ligne commerciale seront définis, ainsi que les coûts d'exploitation et de maintenance.

La RATP est Maître d'Ouvrage délégué, la Société MATRA TRANSPORT étant le Maître d'Oeuvre.



Vue intérieure d'une cabine Aramis

## Etat d'avancement du centre et programme des expérimentations

Le programme du Centre d'Expérimentation Technique d'ARAMIS se déroule sur quatre ans. Ce programme comporte:  
— les études générales du système, des équipements,  
— la réalisation du Centre, de cinq doublets dont les deux derniers seulement doivent être aménagés intérieurement, des automatismes fixes et embarqués,  
— les essais d'intégration, de mise au point fonctionnelle puis de fiabilité et d'endurance.

Le démarrage de l'opération a eu lieu le 1<sup>er</sup> septembre 1984. Dès le début de 1985 a été présentée une maquette à l'échelle 1 de l'esthétique extérieure du véhicule, et d'un aménagement intérieur.

Les emprises du CET boulevard Victor ont été libérées en mai 1985, les infrastructures, bâtiments-voies, ont été terminées en mars 1986 et l'électrification en 750 V des voies en mai 1986.

Le premier doublet, livré sur le CET en avril 1986, après avoir subi des contrôles fonctionnels à poste fixe en atelier, a effectué ses premiers tours de roue en conduite manuelle en ligne en juin 1986.

Au cours du deuxième semestre 1986, l'intégration des automatismes sur le 1<sup>er</sup> doublet menée en parallèle avec la réalisation de automatismes fixes et du PCC a abouti au 1<sup>er</sup> tour en automatique du doublet au mois de décembre 1986. Parallèlement le deuxième doublet effectuait son premier tour en conduite manuelle.

A ce jour, outre les mises au point inévitables, aucun problème majeur n'est apparu au cours des essais. Les essais en automatique du deuxième doublet ont démarré au premier trimestre 1987 et, parallèlement, se dérouleront les mises au point des automatismes sur le premier doublet et la réalisation des doublets suivants.

A l'issue du deuxième trimestre 1987 figure une échéance contractuelle importante dite «premier bilan des performances» en fonctionnement automatique et deux doublets se déplaçant en rame. De plus des indications sur les coûts du système (engagement de MATRA de type ingénierie) seront connues. A ce premier bilan est associée une décision de lancer des études d'industrialisation du matériel et d'application du système à une ligne commerciale.

A partir du deuxième semestre 1987, débuteront les essais fonctionnels en automatique avec plusieurs doublets, suivis d'essais de fiabilité et d'endurance. Si les résultats satisfont au cahier des charges qui précise les taux de défaillance acceptables, le niveau de qualité de service requis etc. la qualification sera prononcée mi 1988.



Vue d'un aiguillage sur la voie du CET

# Le Sky Train de Vancouver

## Un exemple de système automatique guidé urbain sur rails

Dans ce même numéro de RTS, l'article de F. KUHN (page 19) dresse un panorama des systèmes guidés urbains de surface.

Au sein des systèmes de capacité horaire généralement inférieure à celle des métros lourds mais notablement supérieure à celle des bus on trouve également plusieurs réalisations ou projets de systèmes automatiques guidés, principalement en Amérique du Nord, France, Allemagne et Japon. Jusqu'à présent on définit généralement ces transports par le fait qu'il n'y a pas de conducteur à bord des véhicules ni de personnel opérationnel dans les stations, ce qui implique le site propre intégral. Cette catégorie de système est appelée à se développer au cours des prochaines années, mais la «frontière» avec les modes traditionnels pourra progressivement disparaître dans la mesure où certains métros classiques et tramways pourront eux aussi devenir entièrement automatisés.

L'une des réalisations les plus significatives est bien sûr le VAL qui avec son ouverture au public en 1983 a pu être considéré comme le premier métro automatique dans le monde dans un site spécifiquement urbain. Depuis, à l'étran-

ger, le Sky Train de Vancouver ouvert au public en décembre 1985 a été considéré lui comme le premier système automatique sur rails en milieu urbain. Il a été développé par la société canadienne UTDC (Urban Transportation Development Corporation) sur la base des véhicules déjà utilisés à Scarborough près de Toronto, Ontario, mais dans ce dernier cas avec conducteurs. Ce système ALRT (Advanced Light Rail Transit) est également appelé ICTS (Intermediate Capacity Transit System). Les véhicules de longueur 12,7 m comprennent 40 places assises. La ligne longue de 22 km, avec 15 stations a notamment permis de desservir l'exposition internationale des transports en 1986.

Du point de vue interface passagers/système on remarquera l'absence de portes palières.

Du point de vue technique on remarquera d'une part que la commande automatique est réalisée par le dispositif allemand SELTRAC, d'autre part que les fonctions de propulsion et sustentation sont réalisées de manière originale par un moteur linéaire plat associé à un bogie à essieux orientables à roues non indépendantes de 46 cm de diamètre. Le choix de ce type de bogie permet d'abaisser le plancher (1) mais tous les problèmes ne sont pas résolus en ce qui concerne le bruit, l'usure des roues et des rails.

(1) Ce qui a permis la réutilisation de tunnels existant à Vancouver



Le Sky Train sur son site à Vancouver

# Performances d'un canal de transmission numérique sol-véhicules

Marc HEDDEBAUT

Chargé de recherche

INRETS-CRESTA

Centre de Recherche et d'Evaluation  
des Systèmes de Transport Automatisés

utilisant la propagation libre  
de micro-ondes en tunnel

Afin d'élargir la gamme des procédés de transmission entre sol et véhicules dont on dispose dans les transports guidés, un programme de recherche a été lancé sur la possibilité de réaliser des liaisons en hyperfréquences à grand débit dans les tunnels de métro. Ce programme, réalisé dans le cadre du Groupement Régional Nord-Pas-de-Calais pour la Recherche dans les Transports (GRRT) en étroite collaboration avec le Laboratoire de Radio-Propagation et Electronique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, a comporté :

- d'une part une étude sur modèle de simulation des conditions de propagation d'ondes hyperfréquences en tunnel,
- d'autre part des campagnes d'essais sur site.

On trouvera ci-dessous les résultats d'expérimentations effectuées en tunnels routiers et de métros qui sont confrontés aux données obtenues par modèle de simulation (ref. 1).

## Rappels de quelques résultats théoriques et expérimentaux

### Résultats des premières mesures

Lorsque la longueur d'onde d'un signal radioélectrique émis en tunnel est très petite devant les dimensions transversales de la galerie, la propagation de ce signal s'effectue selon des lois similaires à celles auxquelles obéissent les rayons lumineux en optique géométrique.

Le signal reçu à quelque distance de l'émetteur sera ainsi la composition vectorielle de  $n$  rayons s'étant réfléchis à plusieurs reprises sur les parois. L'énergie perdue par réfraction est évidemment d'autant plus faible que le nombre de réflexions est plus réduit.

Les premières campagnes de mesures (ref. 2) montrent effectivement que dans un tunnel métropolitain, les atténuations linéaires décroissent avec la longueur d'onde du signal émis pour tendre vers une valeur modérée d'atténuation linéaire ainsi que l'indique le tableau 1.

Tableau 1: Evolution de l'atténuation linéaire en tunnel en fonction de la fréquence

Fréquence	150 MHz	450 MHz	1 GHz	10 GHz
Atténuation linéique				
Tunnel à section rectangulaire	— 34 dB/100 m	— 18 dB/100 m	— 9 dB/100 m	— 8 dB/100 m
Tunnel à section elliptique	— 30 dB/100 m	— 8 dB/100 m	— 7 dB/100 m	— 5 dB/100 m

On note ainsi qu'à 10 GHz, l'atténuation linéique comprise entre — 8 dB/100 m et — 5 dB/100 m permet d'obtenir une portée de l'ordre du kilomètre en considérant une dynamique du récepteur de l'ordre de 70 dB. Cette portée est intéressante puisqu'elle correspond à une distance comparable aux longueurs d'interstations communément rencontrées dans les métros.

### Le problème des réflexions multiples

Toutefois, comme cela a été indiqué plus haut le champ total reçu en un point de réception est la somme vectorielle de  $n$  rayons s'étant réfléchis  $k$  fois sur les parois. Or, il existe une infinité de chemins possibles joignant le récepteur à l'émetteur. La figure 1 schématise les rayons s'étant réfléchis 0, 1 ou 2 fois sur les parois avant d'atteindre le récepteur.

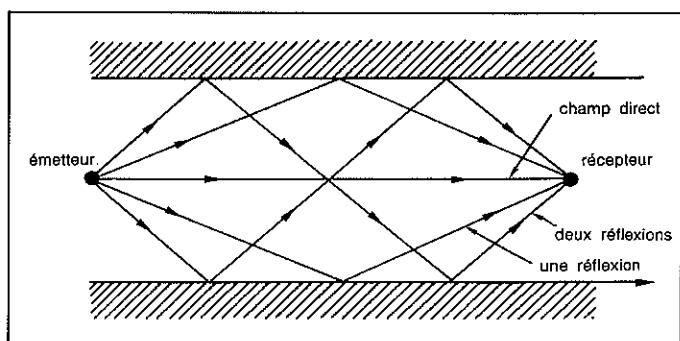


Figure 1: Représentation sur un modèle à deux dimensions des rayons direct et réfléchis 1 ou 2 fois sur les parois avant d'atteindre le récepteur

On conçoit ainsi aisément que cette combinaison vectorielle de  $n$  rayons présentant des différences de marche considérable entre eux peut être soit constructive, soit destructive. Cette situation évolue très vite en fonction du déplacement du récepteur puisque un déphasage de  $180^\circ$  s'obtient à l'aide d'une simple différence de marche de 1,5 cm entre deux rayons (demi-longueur d'onde du signal dans l'air).

En fait, à chaque réflexion sur une paroi, une fraction de l'énergie associée à ce rayon est absorbée. Dès lors, les rayons s'étant réfléchis de nombreuses fois n'apportent plus de contribution notable au champ total reçu. Par suite, lorsque la distance émetteur-récepteur est suffisamment importante, seuls les rayons se propageant sous incidence rasante contribuent au champ total reçu. Une modélisation numérique à trois dimensions permet d'obtenir l'évolution du champ électrique représenté figure 2.

On note effectivement des fluctuations importantes du signal qui peuvent atteindre 40 dB. Lorsque l'on s'éloigne de l'émetteur, ces fluctuations deviennent moins fréquentes et font place à des variations lentes et profondes des signaux reçus.

## Simulation numérique d'une transmission

Afin de prévoir les performances d'une transmission numérique utilisant un tel canal hyperfréquence, il est possible de simuler numériquement la liaison. Le schéma synoptique 1 ci-dessous représente l'évolution du calcul.

Une horloge interne cadence la génération d'un signal numérique. A chaque instant d'horloge  $t_i$ , on associe à ces états numériques le signal hyperfréquence modulé en amplitude, en calculant, à cet instant  $t_i$ , la position de la rame ou du véhicule à partir de son programme de vitesse. La distance émetteur-récepteur est ainsi parfaitement connue quel que soit  $t_i$ .

En utilisant l'approche de l'optique géométrique proposée par Mahmoud et Wait (réf. 3), nous calculons le module et la phase de l'atténuation subie par l'onde hyperfréquence à toute dis-

tance émetteur-récepteur préalablement obtenue. L'ensemble de ces étapes intermédiaires donne la connaissance, quel que soit l'instant d'horloge, du signal hyperfréquence modulé présent à l'entrée du récepteur.

Il est maintenant nécessaire de modéliser le récepteur. Les circuits internes de celui-ci génèrent un bruit que nous assimilons à un bruit blanc limité en fréquence simulé par la méthode de Box et Muller (réf. 4). Nous considérons par ailleurs que la seule contribution de bruit est celle dite thermique (interaction électrons-phonons). Par ailleurs, nous faisons l'approximation que le bruit global généré par le récepteur est celui issu du premier étage d'amplification. Cette approximation est réaliste dès lors que le gain de l'étage est important (réf. 5).

Un facteur également primordial en présence de signaux d'entrée à fluctuations rapides réside dans les performances en dynamique et commande automatique de gain du récepteur. Pour simuler ce comportement, le module du signal d'entrée est appliqué à un filtre passe-bas de constante de temps donnée. Le rapport entre l'amplitude du signal d'entrée filtré et l'amplitude instantanée du signal reçu détermine le rapport signal sur bruit. Celui-ci dépend en outre de la puissance de bruit générée par le récepteur dans sa bande passante et de la puissance du signal reçu par l'antenne.

L'extraction du signal numérique reçu est effectuée à l'aide du calcul d'une fonction d'autocorrélation qui permet de mettre en évidence l'une ou l'autre des fréquences de modulation dans le signal bruité. Les signaux numériques reconstitués sont comparés aux signaux numériques initiaux. Un vote majoritaire deux parmi trois effectué aux instants 7, 8, 9 modulo 16 de chaque bit décrète la validité ou non de l'élément d'information reçu.

On vérifie grâce à ces calculs que les erreurs de transmission se produisent par paquets corrélés avec les évanouissements profonds du signal. Par ailleurs, les résultats montrent qu'à 110 bauds, le taux d'erreurs moyen de la liaison est de:  $4,2 \times 10^{-3}$ , et à 800 bauds:  $8,6 \times 10^{-3}$ . Quant à la répartition de la longueur des paquets d'erreurs, elle est représentée sur la figure 3.

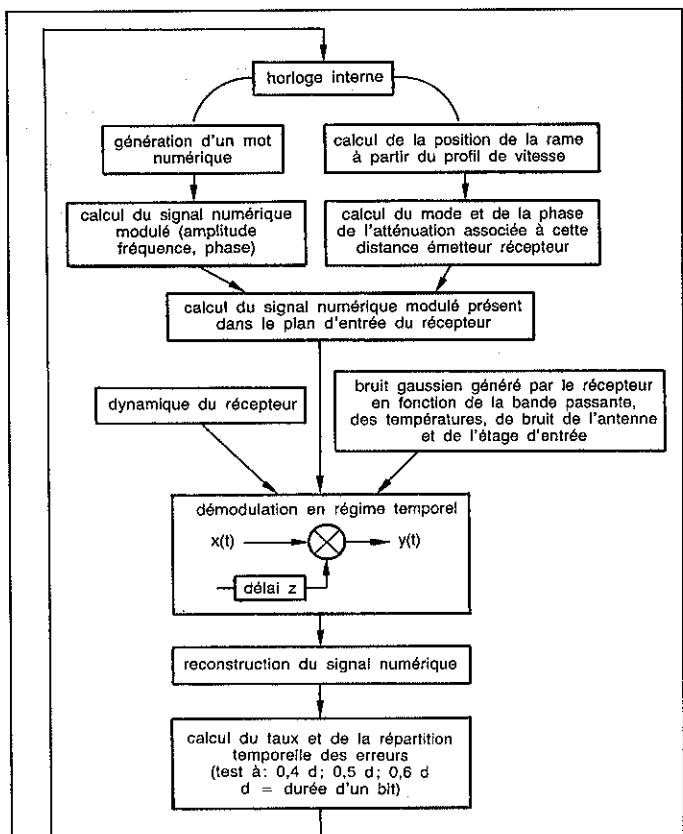


Schéma synoptique 1: modélisation d'un canal de transmission sol-véhicules en tunnel

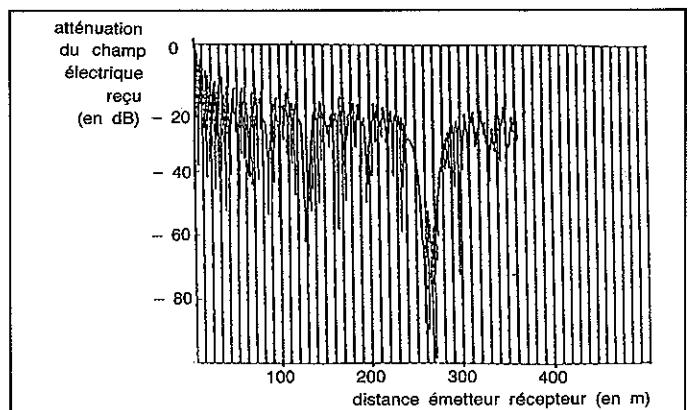


Figure 2: Evolution du champ électrique reçu en fonction de la distance émetteur-récepteur — Simulation numérique en émettant et recevant au centre de la galerie (largeur 6,40 m, hauteur 4,04 m)

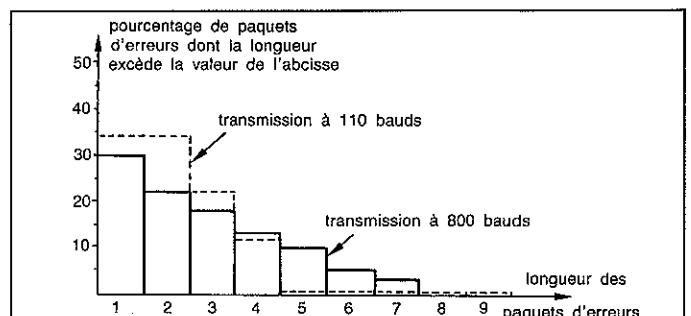


Figure 3: Longueur des paquets d'erreurs en fonction du débit de la liaison

# Présentation technique des équipements de mesure

Nous nous proposons maintenant de décrire la réalisation expérimentale d'une liaison numérique hyperfréquence sol-véhicules et d'un système de détection d'erreurs reproduisant dans une version matérielle les différentes étapes de la simulation exposées précédemment.

## Choix de la vitesse de transmission

Elle est liée à l'objectif assigné: celui d'analyser le plus efficacement possible la liaison. Sur la base d'une vitesse de déplacement de 15 m/s, la rame parcourt une longueur d'onde (3 cm dans l'air) en moins de 2 ms; il n'est donc pas nécessaire de mettre en jeu des débits d'informations très supérieurs à 500 bauds sous peine d'acquérir une quantité de données n'apportant aucune information supplémentaire. Nous avons choisi un débit de 800 bauds, vitesse standard dans les transmissions série. En 82 secondes on émet 65 535 bits; ces 82 secondes correspondent également au temps de parcours courant d'une rame de métro entre deux stations.

## Dispositif émetteur

A chaque état logique 0 ou 1, on associe une fréquence de modulation respectivement 8 kHz ou 12 kHz modulant en amplitude une onde hyperfréquence dans la gamme des 10 GHz. La puissance de sortie de l'émetteur est voisine de 50 mW HF. La source hyperfréquence est verrouillée en phase sur une chaîne multiplicatrice de fréquence bâtie à partir d'un quartz oscillant dans la gamme des 100 MHz. L'ensemble est alimenté sur batterie et portable (réf. 6).

La photographie 1 ci-dessous représente l'émetteur installé sur un trépode, alimenté par batterie et émettant en direction de l'entrée Sud du tunnel routier de Roux (Ardèche).



Photographie 1: Dispositif émetteur 10 GHz en fonctionnement

## Dispositif récepteur

L'équipement de réception comporte deux chaînes réceptrices similaires jusqu'à la démodulation. Celles-ci se composent chacune d'une antenne, d'un mélangeur, d'une chaîne fréquence intermédiaire fonctionnant à 30 MHz.

L'oscillateur local est dirigé par l'intermédiaire d'un coupleur 3 dB vers les deux mélangeurs. La présence de deux chaînes distinctes permet l'utilisation du récepteur en diversité d'espace.

Les signaux démodulés sont sommés, un décodeur de tonalité permet de reconstituer le message numérique.

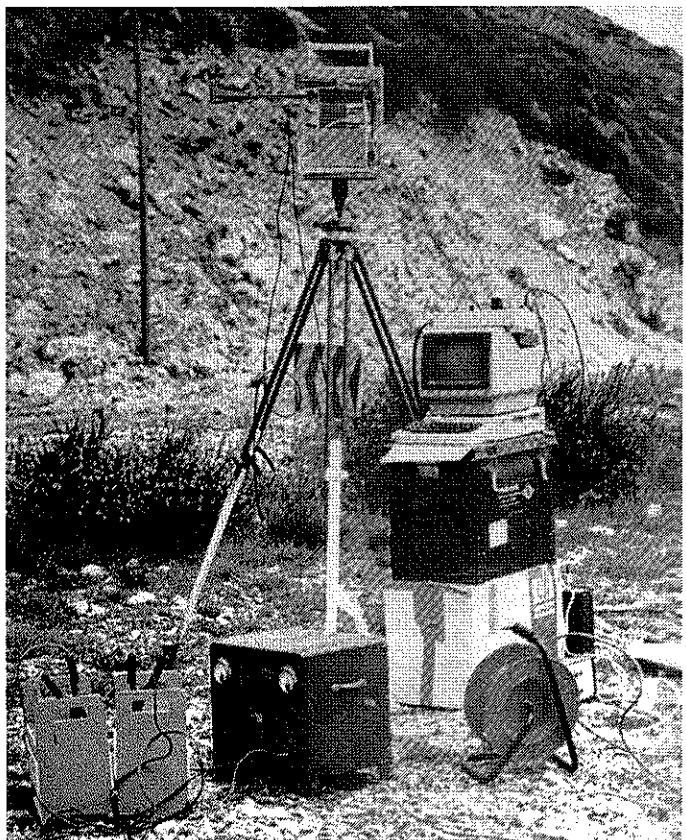
## Traitement du signal numérique

Le message émis est composé d'une alternance illimitée de niveaux logiques haut et bas. Il est aisément de générer un signal identique en réception, le récepteur analyse le signal reçu et déduit ainsi la validité de chaque unité d'information indépendamment des autres. Si celle-ci est exacte, rien ne se passe; dans le cas contraire, le numéro du bit compté de 1 à 65 535 est stocké sur 2 octets binaires.

Une liaison RS 232 permet de récupérer ces informations sur un calculateur, et de les stocker sur disquettes (réf. 7).

L'analyse de la transmission peut alors être réalisée à l'aide de différents logiciels de traitement (réf. 8).

La photographie 2 ci-dessous montre l'équipement de réception muni de deux antennes cornets ainsi que le dispositif d'acquisition de données.



Photographie 2: Dispositif récepteur 10 GHz à diversité d'espace et système d'acquisition de données en fonctionnement sur site d'essai

# Expérimentation en tunnel routier

Les premiers résultats ont été obtenus dans le tunnel de Roux situé sur la D. 160 en Ardèche. Une étude comparative des différents tunnels routiers français effectuée avec le concours du Centre d'Etude des Tunnels (CETU) a permis de choisir ce site d'essai particulièrement propice.

En effet, la longueur totale de ce tunnel est de 3 336 m pratiquement en alignement droit. Celui-ci est peu fréquenté avec environ 150 véhicules par jour; le schéma 2 ci-dessous donne les cotes d'une section de tunnel.

Nous sommes très proches sur ce site expérimental des conditions envisagées dans l'étude théorique précédente.

## Taux d'erreurs bruts

Etudions dans un premier temps les taux d'erreurs bruts de la transmission en fonction du type d'antenne de réception.

Nous avons représenté figure 4 les taux d'erreurs bruts des liaisons en utilisant les antennes suivantes en réception:

- doublet demi-onde,
- cornet gain + 14 dB,
- parabole gain + 18 dB,
- deux cornets espacés de 25 cm en diversité d'espace.

L'antenne d'émission fixe est quant à elle toujours un cornet de + 14 dB de gain, l'équipement de réception est mobile et se déplace d'abord à 30 km/h dans le tunnel.

Un premier résultat important concerne la liaison qui s'effectue

sans problème tout le long du tunnel et même un peu après la sortie de celui-ci sur environ 3 500 mètres.

On observe sur ces courbes que le taux d'erreurs brut de la liaison se trouve dans la zone  $5 \times 10^{-4} < T_{brut} < 5 \times 10^{-3}$  pour les trois antennes élémentaires choisies. Ce taux d'erreurs décroît lorsque la distance émetteur-récepteur augmente. En effet, comme nous l'indiquions précédemment, seuls les rayons se propageant sous incidence rasante contribuent significativement au champ total lorsque la distance émetteur-récepteur est importante.

Statistiquement, on conçoit que si l'on somme les signaux reçus par deux antennes décalées dans l'espace, nous enregistrons moins d'évanouissements rapides des signaux reçus. Cette hypothèse se confirme puisque nous observons une amélioration substantielle des résultats avec cette disposition en diversité d'espace.

## Influence de la vitesse de véhicule

Observons maintenant l'influence de la vitesse de déplacement du véhicule. La figure 5 représente l'évolution du taux d'erreurs brut de la liaison cornet vers parabole lorsque le récepteur mobile en tunnel se déplace à 30 km/h, puis 60 km/h.

Lorsque la vitesse augmente, les constantes de temps de la chaîne d'amplification intermédiaire et de la chaîne de commande automatique de gain ne permettent plus de compenser les fluctuations rapides des signaux d'entrée. Le taux d'erreurs brut de la liaison augmente lorsque la vitesse croît.

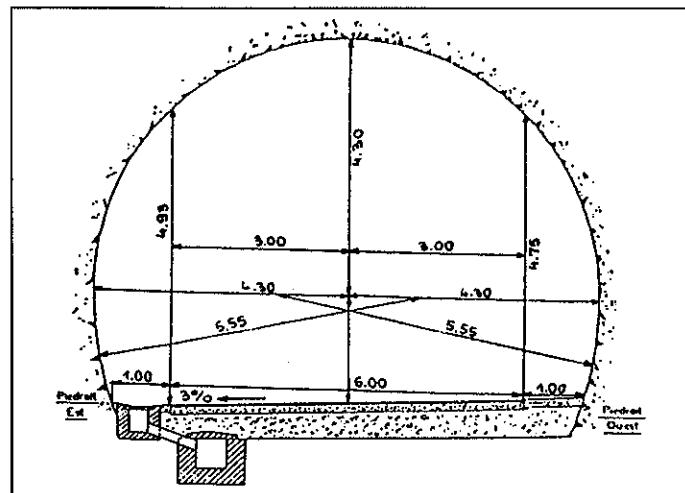


Schéma 2: tunnel du Roux; coupe transversale

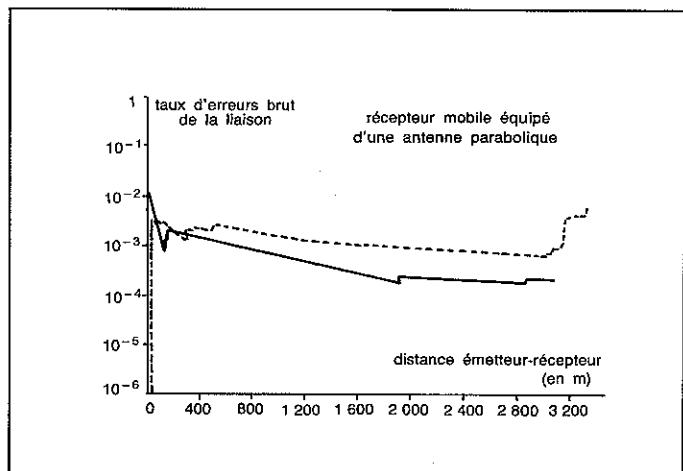


Figure 5: Influence de la vitesse de déplacement du véhicule sur le taux d'erreurs

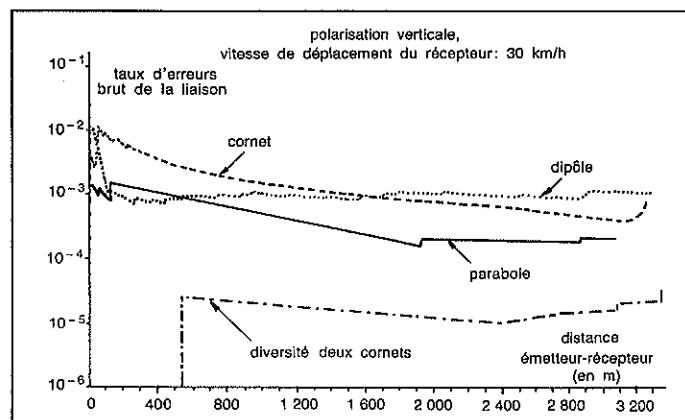


Figure 4: Evolution des taux d'erreurs bruts de la liaison en fonction du diagramme de rayonnement de l'antenne réceptrice

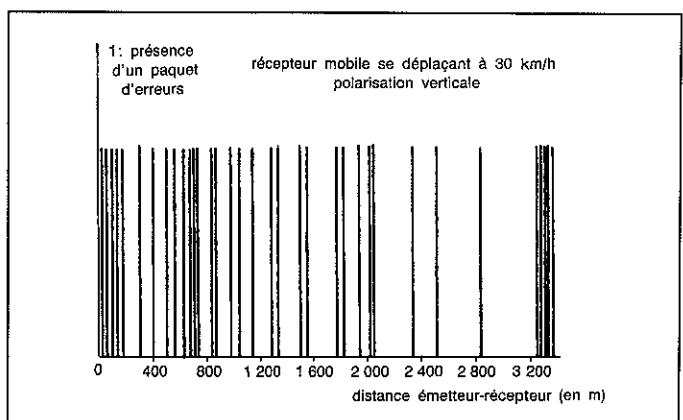


Figure 6: position des erreurs de transmission, l'antenne de réception étant un doublet

## Position des paquets d'erreurs

Il paraît également intéressant de visualiser les positions des paquets d'erreurs de transmission. Les figures 6, 7 et 8 indiquent les positions de ces paquets d'erreurs respectivement dans les cas où l'antenne de réception est: un doublet, une parabole, deux cornets en diversité d'espace.

On note très facilement qu'à l'aide d'une antenne demi-onde, dont le diagramme de rayonnement est très ouvert, on enregistre très fréquemment des erreurs (figure 6); par contre, lorsqu'on réduit l'ouverture du diagramme de rayonnement à l'aide d'une antenne parabolique, le nombre de paquets d'erreurs devient très limité. Si l'on observe à nouveau la figure 4, on constate que les taux d'erreurs bruts de liaison dans le cas de l'antenne dipôle et de l'antenne parabolique ne présentent pas une disproportion aussi évidente qu'entre le nombre de paquets d'erreurs observés figures 6 et 7. Les paquets d'erreurs doivent donc être de tailles différentes.

## Répartition de la taille des paquets d'erreurs de transmission

Les figures 9 et 10 donnent le pourcentage de paquets d'erreurs dont la longueur excède la valeur de l'abscisse dans le cas de réception sur antenne doublet ou parabolique. On a considéré que deux paquets d'erreurs sont distincts s'ils sont séparés par au moins dix bits consécutifs exacts.

Quatre courbes sont représentées sur chacune de ces figures limitant la distance d'observation à 1, 2, 3 ou 4 km; les courbes obtenues pour 2 et 3 km sont confondues dans les deux exemples des figures 9 et 10. Chaque paquet d'erreurs constitue une information, les droites sont tracées en utilisant l'approximation des moindres carrés.

En ce qui concerne la réception avec l'antenne doublet, la longueur des paquets d'erreurs est toujours inférieure à 9 bits. Théoriquement, nous avons trouvé à ce débit une longueur inférieure à 8 bits. La courbe obtenue en prenant 4 000 mètres de portée n'est pas significative puisque nous sortons du tunnel. En effet, en quittant la visibilité optique de la sortie, tous les messages sont quasi-faux, de ce fait les paquets d'erreurs sont très longs.

On peut donc conclure qu'une antenne de réception peu directive introduira beaucoup de paquets d'erreurs de longueurs modérées. Une antenne plus directive permet d'éliminer bon nombre de ces erreurs isolées, mais augmente en revanche la longueur des paquets résiduels.

Physiquement, on peut expliquer ce phénomène en considérant qu'une antenne peu directive effectue une sommation vectorielle sur n rayons, ce qui introduit fréquemment des recombinations vectorielles destructives mais brèves. Par contre, une antenne directive effectue une sommation vectorielle sur un nombre restreint de rayons. Lorsque cette combinaison est destructive, elle le reste plus longuement puisqu'aucun terme de phase supplémentaire n'est apporté par la contribution d'autres rayons.

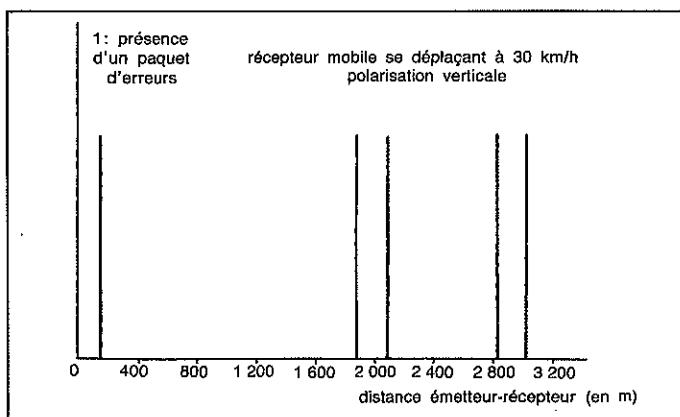


Figure 7: Position des erreurs de transmission, l'antenne de réception étant une parabole

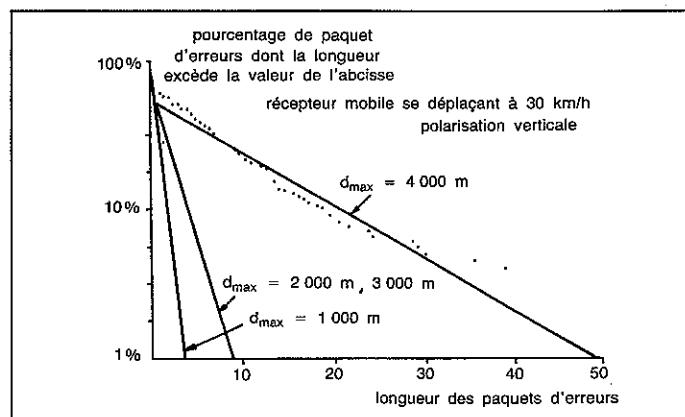


Figure 9: Evolution de la taille des paquets d'erreurs, l'antenne de réception étant un doublet

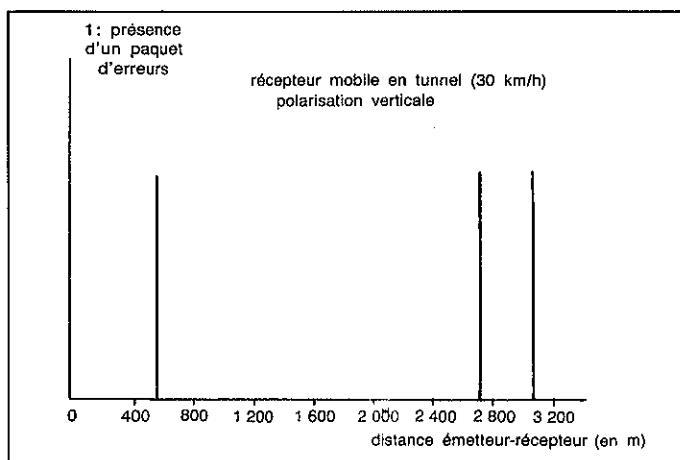


Figure 8: Position des erreurs de transmission, la réception étant en diversité d'espace

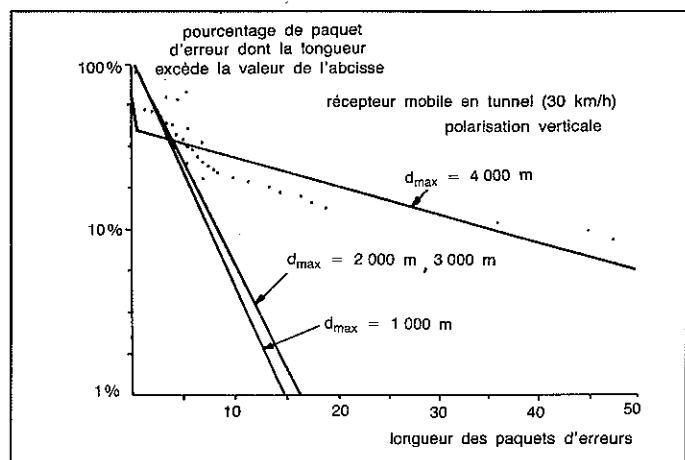
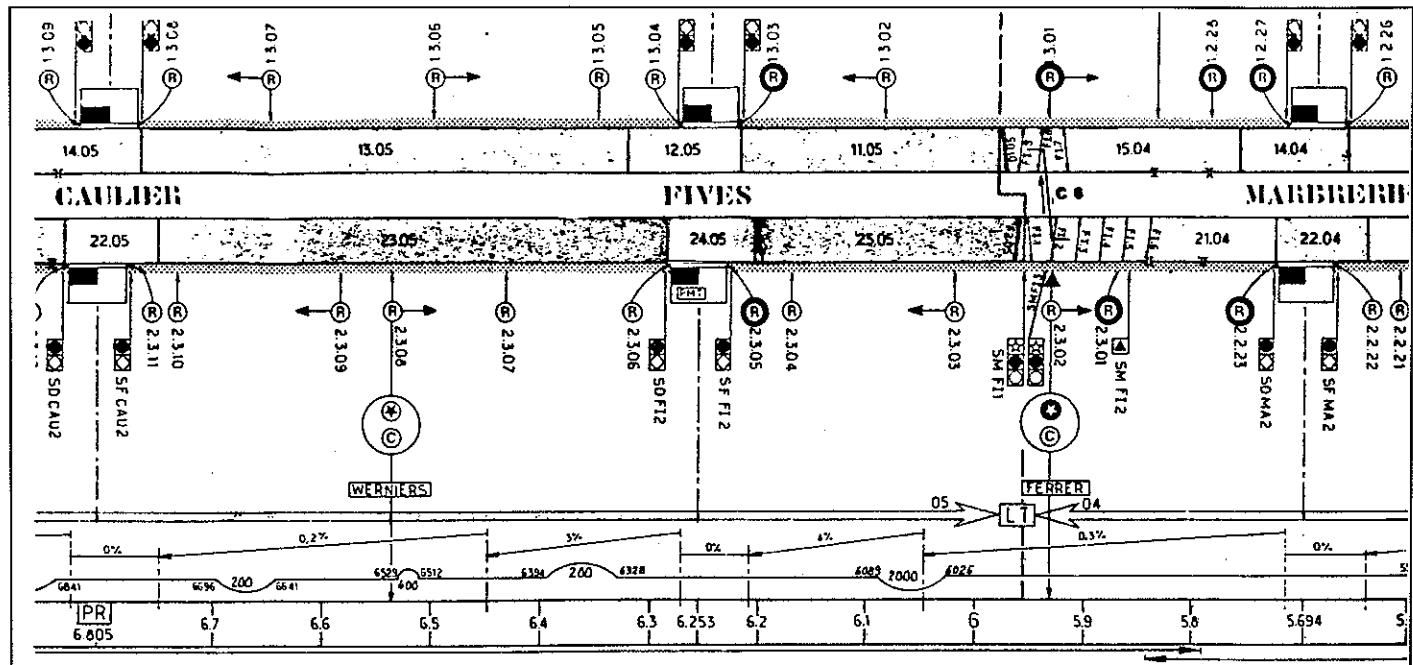


Figure 10: Evolution de la taille des paquets d'erreurs, l'antenne de réception étant une parabole

Schéma 3: Profil de la voie sur le tronçon expérimenté de la ligne 1 du Métro de Lille



## Expérimentation en tunnels de métros

Cette seconde phase de présentation des résultats diffère du modèle théorique et de la campagne de mesures effectuée en tunnel routier.

En effet, ces expérimentations se déroulent de jour en exploitation du réseau. Autrement dit, plusieurs rames sont simultanément dans l'interstation étudiée et forment des obstacles mobiles qui altèrent notablement les performances de la liaison hyperfréquence. Par ailleurs, on ne se situe plus en alignement droit mais en présence de plusieurs courbes.

Le profil de la voie sur le tronçon expérimenté apparaît sur le schéma 3.

Le récepteur hyperfréquence et le dispositif d'acquisition et de traitement de données sont installés station «Fives» sur le quai non aménagé (point noté R schéma 3), la liaison est expérimentée vers les stations «Marbrerie» puis «Helleennes» et «Lezennes» et dans l'autre sens vers les stations «Caulier» et «Gares» sur la ligne 1 du métro de Lille.

L'émetteur quant à lui est installé à l'intérieur des rames derrière le pare-brise du véhicule comme le représente la photographie 4.

### Taux d'erreurs brut de la liaison

Les résultats présentés dans cet article se limitent à ceux obtenus en utilisant une antenne parabolique de gain + 18 dB en réception.

La figure 11 représente l'évolution du taux d'erreurs brut de la transmission numérique lorsque les rames se déplacent de «Fives» vers «Marbrerie». On note que le taux d'erreurs brut de la liaison est de l'ordre de  $5 \times 10^{-3}$ . La portée excède largement l'interstation et est proche de 1 500 m.

Dans l'autre sens de liaison, c'est-à-dire de la station «Fives» vers «Caulier», nous obtenons les résultats représentés figure 12. Il est à noter que dans ce sens de liaison, le récepteur est très mal positionné par rapport à l'axe du tunnel (contrainte

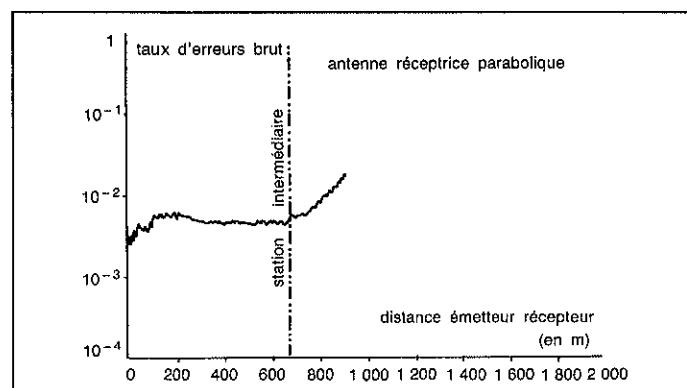


Figure 11: Taux d'erreurs brut de la liaison numérique entre les stations «Fives», «Marbrerie» et «Helleennes»

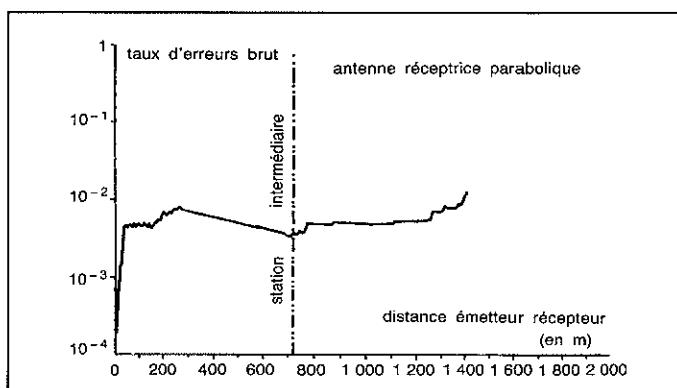


Figure 12: Taux d'erreurs brut de la liaison numérique entre les stations «Fives» et «Caulier»

de sécurité en exploitation); cependant la liaison est assurée sur plus de l'interstation «Fives-Caulier».

Les figures 11 et 12 permettent de distinguer trois phases:

- Une première phase où l'émetteur et le récepteur sont très proches. On peut alors faire abstraction des phénomènes de réflexion sur les parois. Nous nous trouvons ainsi quasiment en espace libre. Le taux d'erreurs de la liaison est faible.
- Une seconde phase où le taux d'erreurs diminue quelque peu lorsque la distance émetteur-récepteur croît. En effet, lorsque la distance augmente, seuls les rayons se propageant sous incidence rasante contribuent significativement au champ total reçu.
- Une troisième et dernière phase qui voit le taux d'erreurs croître rapidement lorsque, en limite de portée, le rapport signal sur bruit moyen devient insuffisant pour assurer la liaison.

## Répartition temporelle des erreurs de transmission

Les figures 13 et 14 représentent l'évolution du pourcentage de paquets d'erreurs dont la longueur excède la valeur indiquée en abscisse. L'ensemble de points obtenus permet de définir une droite par l'approximation des moindres carrés. Celle-ci n'est donnée qu'à titre indicatif. Nous n'obtenons jamais, figure 13, de paquets d'erreurs dont la longueur excède huit bits consécutifs faux et ceci que la distance émetteur-récepteur maximum soit limitée à 620 m (interstation) ou 1 000 m.

Dans l'autre sens de liaison, les performances, représentées figure 14, se dégradent; 1 000 m représentent la portée limite. On trouve de ce fait une forte proportion de paquets d'erreurs de longueur importante. En limitant la portée à 620 m, nous trouvons toutefois encore des paquets d'erreurs de longueur importante (jusque 16 bits consécutifs faux). Rappelons que dans ce sens de transmission: station «Fives» vers «Caulier» puis «Gares», les conditions expérimentales sont peu propices (mauvais pointage de l'antenne émettrice).

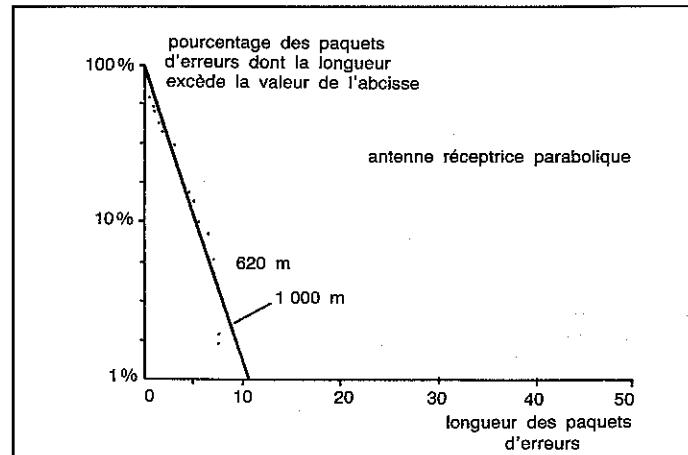


Figure 13: Evolution de la taille des paquets d'erreurs dans le sens de liaison «Fives» → «Marbrerie»

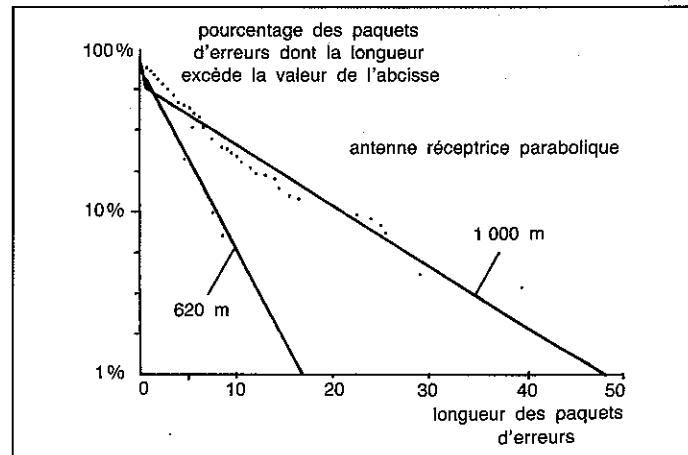


Figure 14: Evolution de la taille des paquets d'erreurs dans le sens de liaison «Fives» → «Caulier»

## Codage de l'information

Les fichiers expérimentaux procurent toutes les adresses des bits erronés. Il est donc aisément par simulation de quantifier les performances d'un type de codage particulier.

Débutons très simplement par l'adjonction d'un bit de parité à un octet d'information transmis. Nous obtenons les résultats décrits dans le tableau 2:

Les résultats ne sont pas concluants. Plus de la moitié des erreurs ne sont pas détectées. Ceci n'est pas étonnant si l'on se réfère à l'évolution de la longueur des paquets d'erreurs.

Ajoutons maintenant  $k$  bits de contrôle pour obtenir le message simulé à transmettre  $M(X)$ . Les  $k$  bits de contrôle sont déterminées de telle manière que le message codé  $M(X)$  soit divisible par un polynôme générateur  $G(X)$ . A la réception, il suffit de diviser le message reçu par le polynôme  $G(X)$  et de vérifier si le reste est nul afin de valider ou non le message reçu.

Nous pourrons de la sorte, à l'aide de différents polynômes générateurs, déterminer l'efficacité du codage, c'est-à-dire dénombrer le nombre de messages reçus faux et non détectés.

Tableau 2: Performances simulées du codage utilisant un bit de parité

ESSAIS	AJOUT D'UN BIT DE PARITÉ			
	TAUX D'ERREURS			
	En nb messages		En nb bits	
	Sans codage	Avec codage	Sans codage	Avec codage
<b>FIVES-LEZENNES</b>				
Cornet	.0588	.032	.0225	.0134
Parabole	.0196	.00909	.00458	.00284
Cornet-diversité	.065	.0336	.0303	.0157
<b>FIVES-GARES</b>				
Cornet	.0215	.00617	.00498	.00221
Parabole	.0202	.00572	.00458	.00164
Cornet-diversité	.0385	.00787	.00657	.00203

tés comme tels. Le tableau 3 indique les performances obtenues avec deux polynômes génératrices de degré 6:

On note ainsi l'importance considérable du choix du polynôme génératrice qui, à degré constant, permet d'obtenir des efficacités très différentes.

Avec un polynôme de degré 7, toutes les erreurs correspondants aux fichiers expérimentaux acquis ont pu être détectées comme l'indique le tableau 4:

Tableau 4: Performances simulées du codage utilisant un polynôme de degré 7

Polynôme génératrice:  $X^7 + X^4 + X^1 + X$

ESSAIS	TAUX D'ERREURS			
	En nb messages		En nb bits	
	Sans codage	Avec codage	Sans codage	Avec codage
<b>FIVES-LEZENNES</b>				
Cornet	.0635	0	.0224	0
Parabole	.0164	0	.00245	0
Cornet-diversité	.0657	0	.0302	0
<b>FIVES-GARES</b>				
Cornet	.0407	0	.00798	0
Parabole	.0538	0	.0127	0
Cornet-diversité	.104	0	.0213	0

## Perspectives

Les caractéristiques de la propagation libre d'ondes électromagnétiques en tunnel résultent de la conjonction de trois facteurs:

- l'affaiblissement dû à la distance,
- les variations des signaux reçus dues aux trajets multiples,
- les variations imputables aux masques mobiles en tunnels (autres rames en interstations).

Ces trois phénomènes interviennent à des échelles de distance de plus en plus petites, le premier donne la moyenne de la puissance à une distance donnée, les deux autres rendent compte des variations autour de cette valeur moyenne.

Nous avons montré qu'à l'aide d'une puissance émettrice faible (50 mW) il est possible d'effectuer une liaison sol-véhicules dans des tunnels routiers ou de métros sur des distances pou-

Tableau 3: Performances comparées de deux codages élaborés à partir de deux polynômes génératrices de degré 6

ESSAIS	TAUX D'ERREURS			
	En nb messages		En nb bits	
	Sans codage	Avec codage	Sans codage	Avec codage
<b>FIVES-LEZENNES</b>				
Cornet	.0626	.0000	.0224	.0000
Parabole	.016	.0000	.00245	.0000
<b>FIVES-GARES</b>				
Cornet	.0374	.000214	.00788	6.1E-5
Parabole	.0526	.000214	.0127	6.11E-5
Polynôme génératrice: $X^6 + X^5 + X^2 + X^1$				
ESSAIS	TAUX D'ERREURS			
	En nb messages		En nb bits	
	Sans codage	Avec codage	Sans codage	Avec codage
<b>FIVES-LEZENNES</b>				
Cornet	.0626	.000614	.0224	.000132
Parabole	.016	.000648	.00245	.000185
Cornet-diversité	.0659	.000415	.0302	5.29E-5
<b>FIVES-GARES</b>				
Cornet	.0374	.00128	.00798	.000336
Parabole	.0526	.00107	.0127	.000275
Cornet-diversité	.098	.00117	.0213	.000167

vant aller jusque plusieurs kilomètres dans les cas les plus favorables.

Les variations rapides des signaux reçus constituent effectivement un handicap à la réception correcte des informations; cependant il est possible d'assurer une liaison numérique avec un taux d'erreurs brut relativement modéré de l'ordre de  $10^{-3}$  en optimisant les antennes utilisées en réception. En outre, un codage de l'information permet d'assurer assez aisément la fiabilité de la liaison.

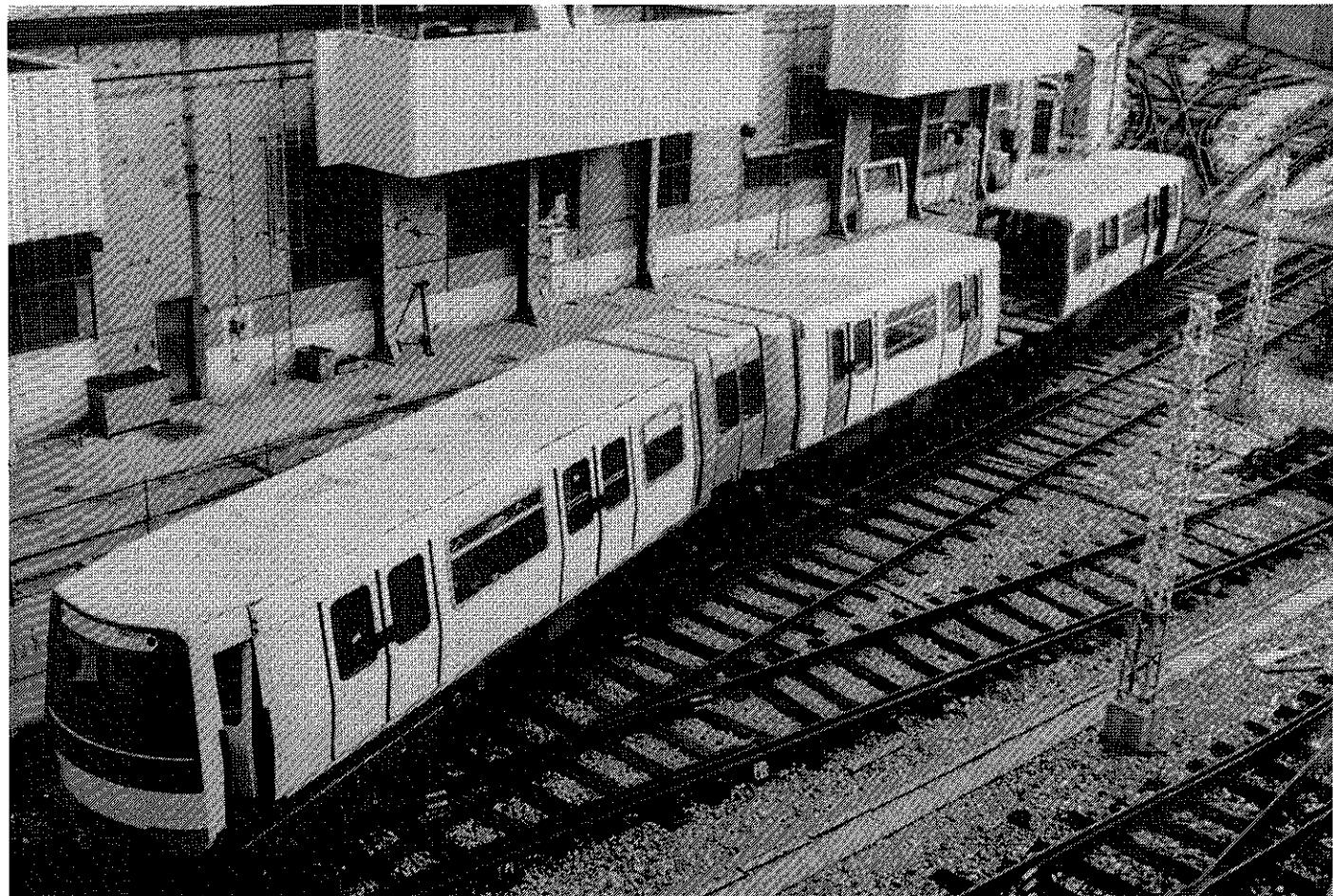
Tous ces résultats montrent que ce procédé de transmission est à prendre en sérieuse considération lorsque l'on souhaite effectuer des transmissions sol-véhicules en galeries tout en minimisant les installations au sol. Ce facteur peut devenir d'importance capitale dans le cas de tunnels de grande longueur.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. *Transmissions numériques en tunnel — Modélisation numérique d'un canal de transmission — Application au calcul du taux d'erreurs d'une transmission numérique* (Heddebaut M.). Rapport de Recherche INRETS, n° 9, ISBN: 2-85.782-151-4.
2. *Etude de faisabilité d'une liaison électromagnétique en interstations à support matériel restreint dans les tunnels du métro de Lille* (Heddebaut M.). Rapport d'avancement, GRRT, avril 1983, pages 25 à 30.
3. *Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnels* (Mahmoud S.F., Wait J.R.). Radio Science, vol. 9, numéro 12, décembre 1974, pages 1117 à 1159.
4. *Les sous-programmes usuels de simulation statistique* (Asselin de Beauville J.P.). Revue de statistique appliquée, volume XXII, n° 4, 1974.
5. *Symposium sur les mesures en radio et hyperfréquences* (Cunningham M.). Publication Hewlett Packard, 9-10 mai 1983, pages 154 à 183.
6. *Liaisons Multimodes Micro-ondes. Réalisation d'un équipement destiné à l'étude expérimentale de transmissions en tunnels sol-véhicules: phonie, vidéo et numérique* (Szlag M., Heddebaut M.). Rapport de contrat AFME, SERT, octobre 1985.
7. *Contribution à la caractérisation d'une liaison hyperfréquence en tunnel. Réalisation de la partie analyse logique à microprocesseurs* (Degardin D., Baudet J.). Rapport de contrat IRT-USL, septembre 1985.
8. *Traitements d'erreurs. Codage. Utilisation d'un canal hyperfréquence pour effectuer les liaisons sol-véhicules du VAL* (Jennequin S.). Rapport de fin d'études DESS, juin 1986.

# Métro BOA à essieux orientables et intercirculation

Jean-Pierre RAGUENEAU  
RATP



Rame d'essai sortant des ateliers d'entretien

Depuis plusieurs décennies, le roulement ferroviaire est en butte aux conséquences induites par le défaut de radialité des essieux de bogies en courbe. Cet inconvénient, très sensible sur les tramways, est devenu de plus en plus contraignant sur les réseaux de métro; cette évolution négative que l'on a l'habitude d'attribuer aux caractéristiques des bogies modernes: le «carrément» (maintien très strict de la rectangularité du châssis) qui induit une absence de possibilité de se déformer en parallélogramme, jeux réduits, utilisation de bogies monomoteurs imposant une même vitesse de rotation des quatre roues d'un bogie, se traduit par des crissements, des vibrations et une usure ondulatoire des rails provoquant elle-même des vibrations néfastes aux trains qui les parcoururent.

Cette situation ne pouvait perdurer; la RATP a alors entrepris une étude assez fondamentale pour tenter de trouver une solution simple et efficace à ce problème.

## L'analyse du problème

Les usures, crissements, sont en principe dûs à «l'attaque» des roues par rapport aux rails dans les courbes; il est admis couramment que cette agression est due à deux phénomènes.

### Le défaut de radialité des essieux

Les essieux ne se positionnent pas systématiquement suivant le rayon des courbes, les roues qui lui sont perpendiculaires ne sont pas tangentes au rail et l'attaquent. Dans la mesure où un bogie maintient les essieux quasiment parfaitement parallèles, un, au moins de ces essieux n'est pas radical (cf. figure 1). Pour des bogies de plus de 2 mètres d'empattement, le défaut de radialité dépasse notamment  $2^\circ$  dans les courbes les plus serrées du réseau du Métro de Paris.

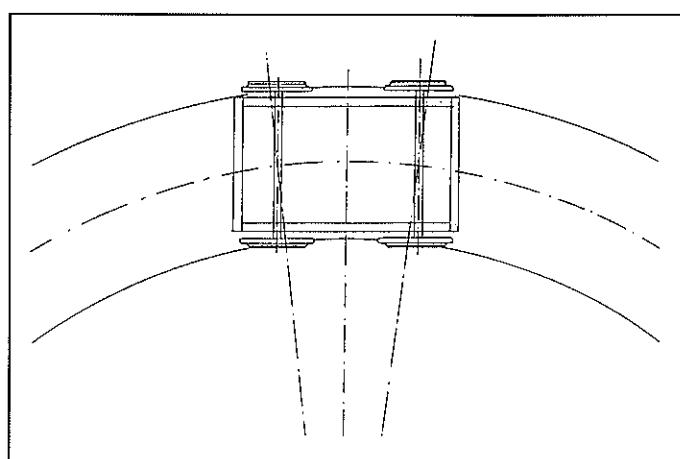


Figure 1: illustration du défaut de radialité des essieux

## La dépendance des roues en rotation

La technologie ferroviaire vit sur la base d'un roulement composé d'essieux sur lesquels sont «calées» des roues; par conséquent, tous les éléments de l'ensemble tournent à la même vitesse angulaire; dans une courbe, les deux roues n'ayant pas le même chemin «linéaire» à parcourir, au moins une des roues «glisse» par rapport aux rails, provoquant des usures, des arrachements de métal. La conicité des roues constitue certes une réponse à ce problème, mais une réponse partielle dans la mesure où elle ne peut être suffisante pour compenser les différences de chemin parcouru. Il nous faut alors évaluer le comportement des roues non liées en rotation (roues indépendantes) à basse vitesse et en courbe de faible rayon.

Il convient donc, comme cela tend à se développer sur de nombreux réseaux, de rechercher des solutions à essieux orientables (ou orientés) et à roues indépendantes (en rotation).

Mais, au-delà de ces réflexions, la RATP a retenu deux autres facteurs dans son étude.

## L'optimisation de la charge à l'essieu

Les infrastructures du réseau de métro parisien autorisent une charge de quinze tonnes par essieu. Suivant le nombre de personnes transportées, les voitures de métro «pèsent» entre 40 et 43 tonnes, soit une charge par essieu inférieure à 11 tonnes. En concevant des voitures plus courtes (10 mètres au lieu de 15 actuellement) roulant sur deux essieux seulement, on tiretrait pleinement partie des possibilités des infrastructures. Par ailleurs, la disparition des bogies, remplacés par ces essieux, entraînerait un sensible allégement des rames. Toutefois, la présence d'un dispositif de guidage s'avèrerait indispensable pour éviter que les essieux se mettent de travers et qu'ils sortent de la voie.

## L'intérêt d'une intercirculation habitable

Concevoir une intercirculation «habitabile» (c'est-à-dire apte à recevoir des voyageurs assis et debout dans des conditions de confort acceptable) permet d'augmenter de quelques pourcents la capacité des trains et de changer sensiblement l'aspect des voyages; en particulier, il devient possible d'envisager des zones spécialisées dans les trains, vidéo, cafétéria.

Encore fallait-il concevoir un système de guidage des essieux à la fois simple et fiable.

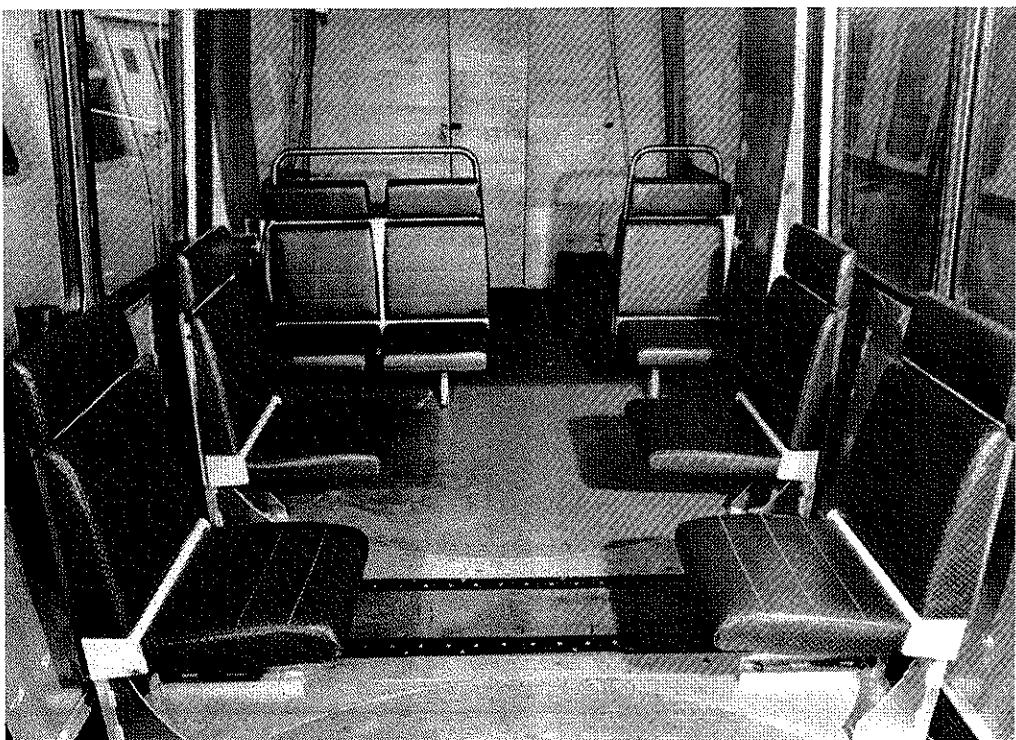
## Le guidage des essieux

La RATP n'est pas la première à s'intéresser aux essieux orientables. Au siècle dernier, l'Ingénieur Arnoux avait conçu un étrange mécanisme qu'il avait testé sur la ligne de Sceaux, l'ancêtre de notre ligne B du RER. Depuis une dizaine d'années les expériences se sont multipliées tant au Canada (réseau de Vancouver, ALRT), qu'en Afrique du Sud (bogie «Scheffel») ou en Grande-Bretagne, chez nos homologues du London Transport (bogie à essieux orientables). Nos voisins d'Outre Rhin se sont aussi intéressés à des véhicules ferroviaires montés sur des roues indépendantes orientables. Cette solution est certainement la plus proche de la démarche développée à la RATP.

Dans un souci d'allégement du matériel roulant, la RATP avait conçu, il y a une trentaine d'années, un métro articulé dont les caisses reposaient sur des bogies intermédiaires. Ce matériel circule encore sur la ligne 10 (Gare d'Austerlitz-Boulogne) et est très utilisé pour la conception de tramways. Depuis, cette solution a été reprise, dans le TGV par exemple. Même si les gains de poids et les possibilités d'intercirculation sont intéressants, la présence des bogies ne diminue en rien les efforts engendrés sur la voie et leur position intermédiaire complique singulièrement les manœuvres de couplage/découplage des voitures lors des opérations d'entretien.

Le système de guidage imaginé à la RATP tourne le dos à ces différentes solutions. Il repose sur une relation géométrique simple (voir encadré). C'est le mouvement de rotation de la barre d'attelage par rapport à l'axe longitudinal des deux voitures adjacentes qui sert à guider la position des essieux orientables. Ce système n'est évidemment applicable qu'aux essieux intermédiaires du train. Le guidage des essieux extrêmes est réalisé d'une manière un peu différente. On fixe perpendiculairement à la demi-barre d'attelage, solidaire de l'essieu extrême, un second essieu à roues indépendantes. On recrée ainsi un «faux bogie» dont le premier essieu a un comportement analogue au bissel de certaines locomotives. Cet essieu directeur, peu chargé, lit les sinuosités de la voie et ses mouvements servent alors à guider l'essieu extrême. Si la géomé-

Vue intérieure de la rame d'essai dans la zone d'intercirculation



trie est à nouveau respectée (voir encadré) ces deux essieux extrêmes sont eux aussi dans une position radiale.

## La vérification des concepts précédents

La RATP a alors voulu vérifier sur son réseau le bien fondé des concepts précédents. Pour cela, ses parcs de rechange ont été mis à contribution. Les ponts-moteurs des matériels sur pneumatiques sont équipés de différentiels et permettent, en supprimant les roues sur pneumatiques et en remplaçant les roues de sécurité par des roues d'acheminement au profil classique, de rouler sur une voie fer classique avec des roues motrices indépendantes. Tout l'équipement de traction-freinage est celui du matériel roulant sur la ligne 6. Les caisses sont issues des chaudières du matériel MF 77, etc.

Afin de financer une partie de la réalisation de ce train, l'ANVAR et l'AFME ont participé à ce développement sanctionnant par ces aides l'aspect novateur et les espoirs d'allègement du matériel roulant.

Un premier stade avait consisté à équiper deux poutres en fer de 10 mètres de long d'essieux orientés tels que ceux décrits ci-dessus et à les faire circuler sur le réseau comme des véhicules remorqués. Ensuite, le train d'essais de trois voitures a débuté ses essais en 1985. Fin 1986, les essais sont achevés. Les résultats peuvent se résumer comme suit:

- Tous les essieux sont radiaux dans toutes les courbes. L'erreur maximale est de 20' sauf pour l'essieu extrême qui est radial à moins de 10' près lorsqu'il est en queue de train; il est radial à 30' près lorsqu'il est en tête.
- Les efforts de guidage sont très faibles (quelques centaines de daN) sauf sur les appareils de voie où ils atteignent 2 à 3 tonnes, ce qui reste très acceptable sur les pièces considérées.
- Les crissements dans les courbes ont disparu à peu près complètement.
- Les efforts générés dans les voies en courbe sont sensiblement inférieurs à ceux provoqués par les bogies classiques.
- L'intercirculation s'est géométriquement bien comportée.
- L'indépendance des roues est impérative. Elle complique toutefois les commandes de traction et de freinage et impose un dispositif d'anti-enrayage et d'antipatinage performants.

— Le train d'essais équipé de roues porteuses sur pneumatiques mais sans les roues de guidage habituelles, a circulé sur les voies sur pneumatiques avec succès. On peut donc imaginer un tramway sur roues équipées de pneumatiques ce qui résoudrait des difficultés d'adhérence (sauf sur verglas) et de bruit des tramways classiques.

## Et maintenant?

Les essais du prototype de Métro-Boa sont terminés depuis l'automne. Le train d'essai est actuellement en atelier afin d'être équipé d'une voiture supplémentaire, puis d'être aménagé et décoré. Une fois ces travaux achevés, Métro-Boa reprendra du service (vers fin 1987 ou début 1988) sur le réseau parisien. Durant plus d'une année, il sera mélangé durant les heures creuses aux autres trains assurant le service voyageurs de manière à réaliser des essais d'endurance.

Parallèlement, des pré-études industrielles sont en cours. Réalisées par les services d'études des constructeurs de matériels ferroviaires, elles visent à préciser l'architecture des Métros-Boa de pré-série. L'abandon du bogie et la simplicité du système de guidage des essieux se traduisent par un allègement spectaculaire des trains (20% environ). Par conséquent, on peut envisager d'allonger les voitures sans induire des sollicitations excessives des infrastructures. En revenant à des voitures de longueur normale de 15 mètres (au lieu de 10 mètres sur le prototype actuel), on porte la charge maximale à l'essieu de 15 à 18 tonnes. Cet accroissement ne sera sensible que sur les ouvrages de faible portée (moins de 4 mètres). En revanche, les ouvrages de plus grande portée seront soumis à de moindres contraintes: une voiture de 15 mètres ne pesant plus que 36 tonnes au lieu de 42 tonnes actuellement.

Parallèlement, la RATP poursuit des études et des expérimentations concernant l'architecture informatique et les transmissions d'informations, des trains, avec par exemple, l'utilisation de fibres optiques, de multiplexage, et d'équipement de traction-freinage utilisant des thyristors à GTO.

Si les résultats des essais d'endurance s'avèrent positifs, la RATP pourrait commander en 1988 ou 1989 une pré-série d'une dizaine de trains «Métro-Boa», s'inspirant de ces principes.

Rame d'essai en station avec roues sur pneumatiques



# Métro Boa

## Un peu de géométrie

Les voitures actuelles du Métro de Paris mesurent 15 mètres et reposent sur deux bogies à deux essieux (schéma A). La charge par essieu ne dépasse pas 11 tonnes alors que les infrastructures peuvent accepter jusqu'à 15 tonnes sur l'ensemble du réseau. L'idée est venue de réaliser des voitures plus courtes (10 mètres environ), d'une trentaine de tonnes seulement, reposant sur deux essieux. Mais des voitures à essieux fixes (schéma B) ne pourraient pas s'inscrire dans les courbes (le rayon minimal avoisine 30 mètres à la station Bastille et dans la boucle de la Porte Dauphine). A l'image du métro articulé ou du TGV, on pouvait placer des bogies intermédiaires entre les voitures (schéma C). Mais cela interdit toute manœuvre de couplage/découplage des voitures en dehors des ateliers et, en outre, les interactions roues-rail restent les mêmes qu'avec un train traditionnel. La solution retenue est celle d'essieux orientables à roues indépendantes qui se placent radialement dans les courbes (schéma D). Les efforts engendrés sur la voie deviennent bien moindres et les voitures peuvent être manœuvrées sans difficultés hors des ateliers.

Le guidage des essieux orientables est assuré par un dispositif mécanique dont la conception repose sur des relations géométriques assez simples. Le mouvement de rotation de l'essieu, autour du pivot de fixation sous la

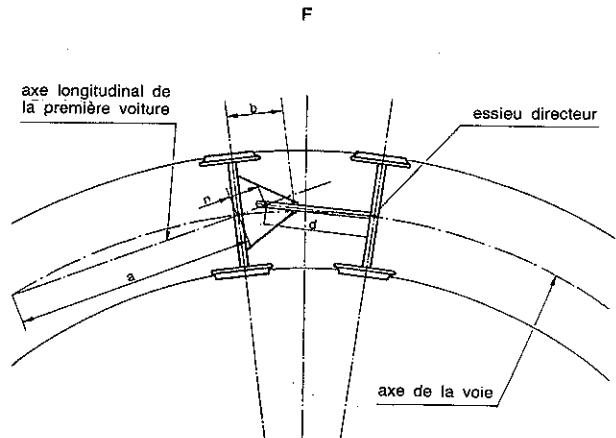
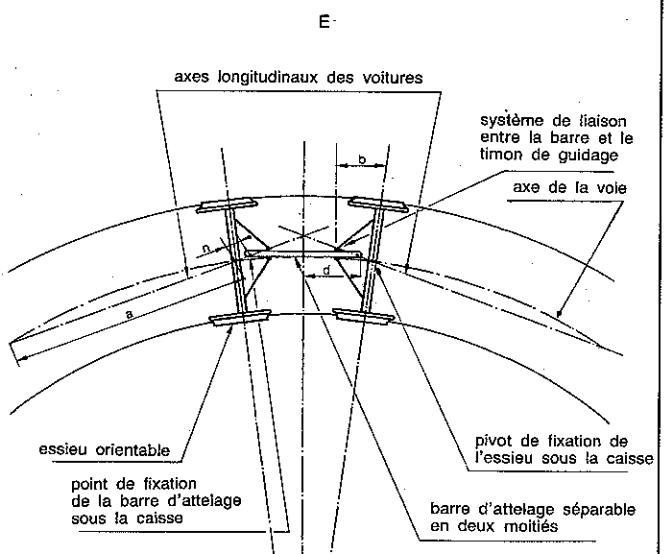
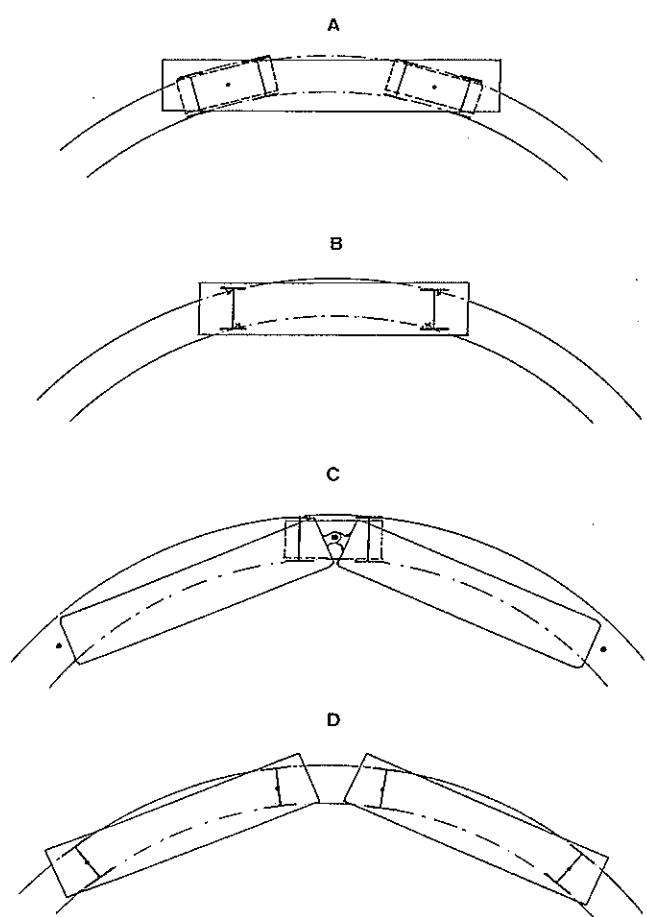
caisse de la voiture, est commandé par une sorte de timon qui a la forme d'un triangle (schéma E). L'extrémité de ce timon est solidaire de la barre d'attelage qui relie les deux voitures. Si par construction, on conçoit ce dispositif avec des dimensions telles que

$$b = n + \frac{n a}{2(n + d)}$$

Les déplacements de la barre d'attelage vont imposer, via le timon, des mouvements de rotation des essieux qui viendront se placer dans une position quasi-radiale. Pour les essieux orientables situés en tête et en queue du train, on modifie le système de guidage au moyen d'un essieu directeur fixé sur la demi-barre d'attelage (schéma F). En respectant une seconde contrainte géométrique

$$d^2 = n(n + a)$$

Ce système assure lui aussi parfaitement le guidage des essieux extrêmes. Parce qu'il repose sur une analyse géométrique et trigonométrique dont les résultats se traduisent par des pièces mécaniques de longueur imposées, le système de guidage des essieux, imaginé pour Métro-Boa, est à la fois simple, fiable et performant.



# Cinémomètre à effet Doppler

Pascal DELOOF

Chargé de recherche

INRETS CRESTA

Centre de Recherche et d'Evaluation  
des Systèmes de Transport Automatisés

Jean VINDEVOGHEL

CHS-USTL

Jacques BAUDET

LRPE-USTL

## Cadre de la recherche

La mesure de la vitesse et de la distance parcourue par les véhicules repose dans les transports terrestres sur des dispositifs de comptage de tours de roues. Cette mesure est peu précise par suite de phénomènes tels que le patinage, et tous les exploitants de systèmes de transport sont intéressés au développement de procédés indépendants du mouvement des roues. C'est pourquoi l'utilisation de cinémomètres à effet Doppler est envisagée depuis de nombreuses années dans les transports ferroviaires.

Dans le but d'appliquer les technologies de pointe au développement de tels capteurs, une première étude avait été confiée en 1980 par l'EPALE (Etablissement Public d'Aménagement de Lille-Est), à l'origine de la première ligne VAL, au CHS (Centre Hyperfréquences et Semiconducteurs), laboratoire spécialisé dans la conception de circuits actifs micro-ondes sur As Ga (Arsénure de Gallium) (réf. 1).

Depuis 1983, cette étude rassemble, au sein du GRRT (Groupement Régional Nord-Pas-de-Calais pour la Recherche dans les Transports) d'une part le CHS, d'autre part le CRESTA (Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transport Automatisés) qui a pris la succession de l'EPALE dans cette opération, et le LRPE (Laboratoire de Radio Propagation et d'Electronique) chargé d'étudier le traitement du signal. En outre, la SINTRA a été associée à la phase de réalisation d'une maquette (réf. 2).

Le but de ce projet est d'aboutir, grâce aux techniques d'intégration de composants actifs sur As Ga et par l'emploi d'antennes plaquées, à un capteur miniaturisé de faible coût et de fiabilité meilleure.

Les sujets abordés dans le projet ont été les suivants:

- conception d'un circuit oscillateur monolithique sur As Ga (réf. 3),
- optimisation d'antennes plaquées (réf. 4, 5),
- optimisation du traitement de signal.

## Etat d'avancement des travaux

### Conception d'un circuit oscillateur monolithique

Les premiers essais ont été réalisés en technologie hybride, puis différents montages ont été intégrés sur As Ga.

#### Prototypes hybrides

Plusieurs montages ont été câblés en technologie hybride afin de valider la théorie. Ces montages comportaient le minimum de composants. Le schéma donnant la meilleure stabilité est donnée fig. 1; il s'inspire du montage Colpitts adapté pour les hautes fréquences, compte tenu des éléments parasites du TEC (Transistor à Effet de Champs) tels que la capacité drain-grille (de l'ordre de 50 fF). Ce montage utilise trois transistors NEC 244 dont l'un est modifié en varacteur par réunion du drain et de la source. L'inductance (0,62 nH) est constituée d'une boucle de fil d'or longue de 0,6 mm environ.

Le circuit a été réalisé sur une plaquette de céramique d'alumine dorée de 6 x 6 mm<sup>2</sup>. Sous la couche d'or, une cou-

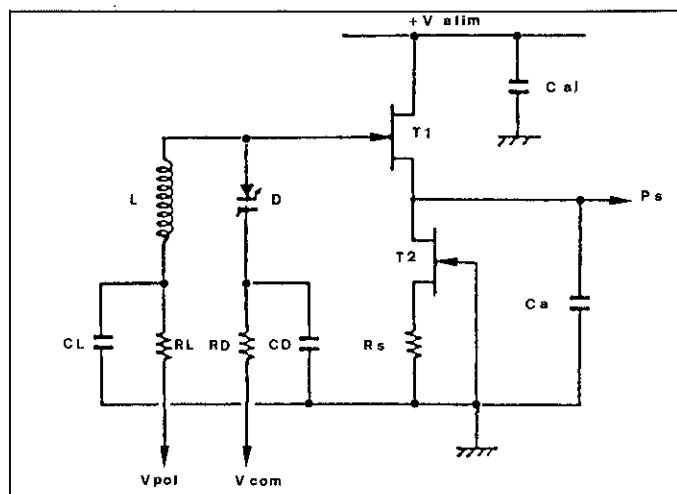


Figure 1: Schéma de l'oscillateur

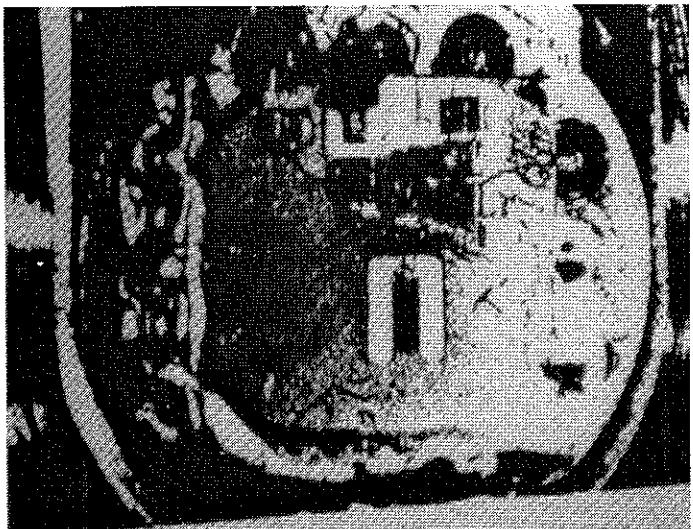


Figure 2: Photo du prototype hybride

che de nickel-chrome, dégagée par gravure, sert à la réalisation de résistances.

Les composants sont collés et interconnectés par des fils d'or ( $\varnothing 25 \mu\text{m}$ ) thermocomprimés. Le tout est collé sur une embase portant les broches et le minicâble coaxial de sortie HF (fig. 2).

Les conditions d'essais ont été les suivantes: tension d'alimentation égale à 6 v, polarisation de grille de T1 réglée à 3 v, tension de commande du varactor variant de 3 à 12 v. La visualisation s'effectuait sur un analyseur de spectre HP 8555. Cet essai a confirmé les prévisions de calcul: l'oscillation se maintenait sur une bande de 9,2 à 10,3 GHz avec une atténuation de l'harmonique 2 à 10 dB. Cependant, le fonctionnement de ce montage était perturbé lors de l'excursion en fréquence par l'apparition de résonances multiples dues aux éléments parasites de câblage, éléments disparaissant dans la version monolithique.

#### Réalisation de prototypes monolithiques

Une première simulation par le programme «SPICE 2» a permis la transposition du schéma hybride en version monolithique et la réalisation d'un prototype (fig. 3). Sa surface est d'environ  $1,2 \text{ mm}^2$ . L'inductance d'accord est de forme octogonale et le condensateur d'appoint est fait en technique interdigitée.

Les capacités de découplage, de forte valeur ont eu recours à une technique nouvelle au CHS, celle du film polyimide emprisonné entre deux couches de métallisation.

Malheureusement, cette technique étant mal maîtrisée, ces condensateurs se sont révélés en court-circuit pour la plupart pro-

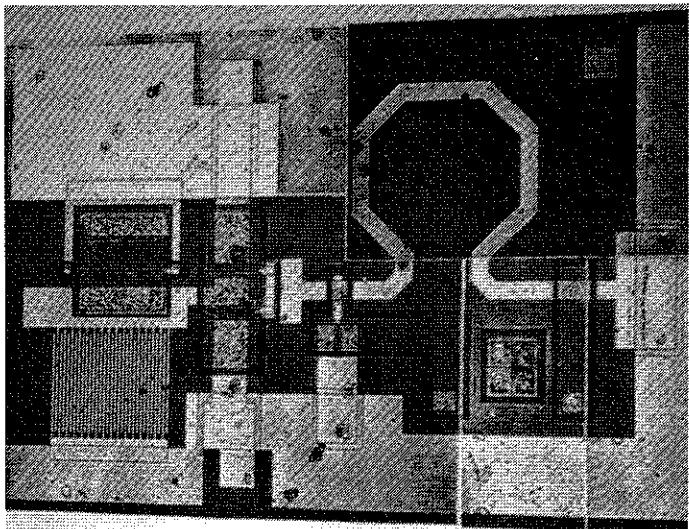


Figure 3: 1<sup>er</sup> prototype intégré

voquant le disfonctionnement des prototypes. Après un deuxième essai également infructueux, malgré l'augmentation de la couche de diélectrique, une étude approfondie de l'implantation de tels composants s'est avérée nécessaire à la poursuite du projet.

Finalement, ces études ont abouti à un prototype opérationnel (fig. 4), dont le schéma est simplifié au niveau du nombre de composants intégrés.

Les caractéristiques du TEC réalisé pour l'oscillateur sont:

- dimensions de grille:  $150 \times 0,7 \mu\text{m}^2$
- capacité grille-source:  $0,15 \text{ pF}$
- résistance d'accès de grille:  $10 \Omega$
- transconductance  $20 \text{ mS à } 20^\circ\text{C}$ .

Les conditions d'essais ont été:  $V_{gs} = -1 \text{ v}$ ,  $V_{ds} = 5 \text{ v}$  et  $I_{ds} = 25 \text{ mA}$ .

La fréquence obtenue est 7,44 GHz au lieu des 10 GHz prévus. L'accord dépend en effet de la réactance globale du montage, puisque la taille de la puce ne permet pas d'y implanter un résonateur diélectrique ou imprimé.

Cette fréquence peut être légèrement ajustée à l'aide de la tension de polarisation de grille  $V_{gs}$  par son effet sur la capacité grille-source interne.

Cette possibilité est exploitée pour stabiliser la fréquence en fonction de la température, principale source de dérive: une diode Schottky est implantée sur la puce à proximité du TEC oscillateur, de façon à lui être couplée thermiquement, et l'on

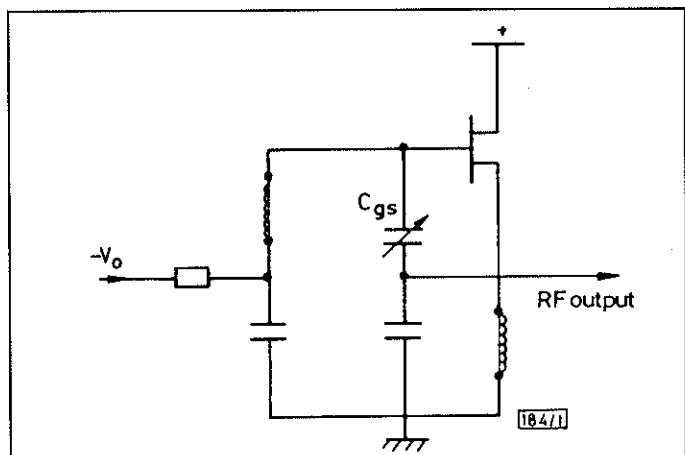


Figure 4: Schéma du 2<sup>e</sup> prototype

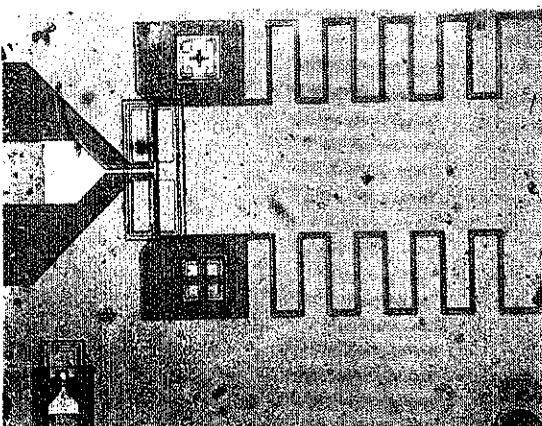


Figure 5: 2<sup>e</sup> prototype intégré

utilise les variations de la caractéristique I/V de la diode (fig. 6) pour réagir sur la tension de polarisation de grille du TEC et compenser sa dérive à l'aide d'une boucle d'asservissement (fig. 7).

Cette boucle comprend une EEPROM contenant la fonction de correction, un microprocesseur et un convertisseur numérique analogique. S'il était possible d'obtenir une loi de variation fréquence-température linéaire, la boucle pourrait alors se résumer à un comparateur analogique et le tout serait implanté sur la puce.

La solution actuelle, plus complexe, a été choisie pour être optimisée extérieurement quelle que soit la loi de variation. Dans ces conditions, la fréquence est stabilisée à mieux que 1 MHz dans toute la gamme de température de - 40 à + 80 °C (fig. 8). L'effet de la température sur la puissance de sortie est un peu accentué par la boucle (fig. 9); néanmoins, la puissance reste voisine de 30 mW et le rendement est d'environ 25%.

Parallèlement à ces études sur la source micro-onde, le CHS a abordé le problème de l'intégration des antennes.

## Miniaturisation des antennes sous forme plaquée

### Intérêt de l'antenne plaquée

Jadis les antennes micro-ondes étaient issues de la technique des guides d'ondes, leurs dimensions étaient conditionnées par la longueur d'onde dans l'air ( $\lambda_0$ ), ce qui les rendaient lourdes et encombrantes. L'antenne plaquée est apparue avec les circuits imprimés et la technique «microruban»: une plaque diélectrique métallisée double face dont l'une est un plan de masse et l'autre porte la gravure de l'antenne. La présence du diélectrique permet de réduire artificiellement la taille des éléments rayonnants par concentration des lignes de champ. Ces antennes sont légères, peu encombrantes et robustes, de plus une couche isolante leur assure une protection efficace contre les agents extérieurs.

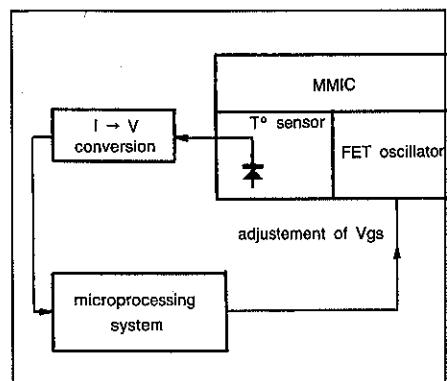


Figure 7: Stabilisation en fréquence

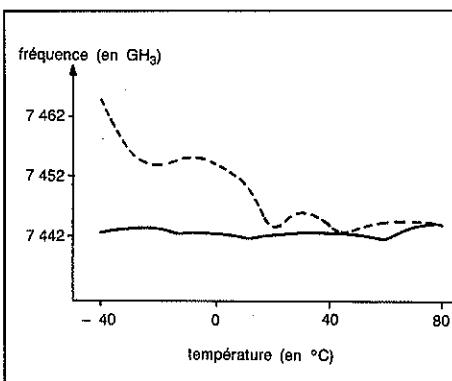


Figure 8: Effet de la stabilisation de fréquence

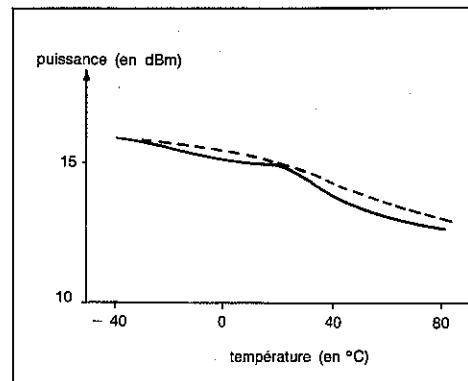


Figure 9: Effet de la boucle sur la puissance

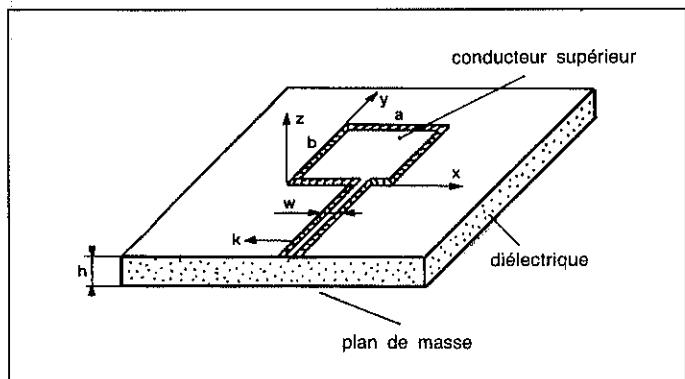


Figure 10 A: Antenne «Patch»

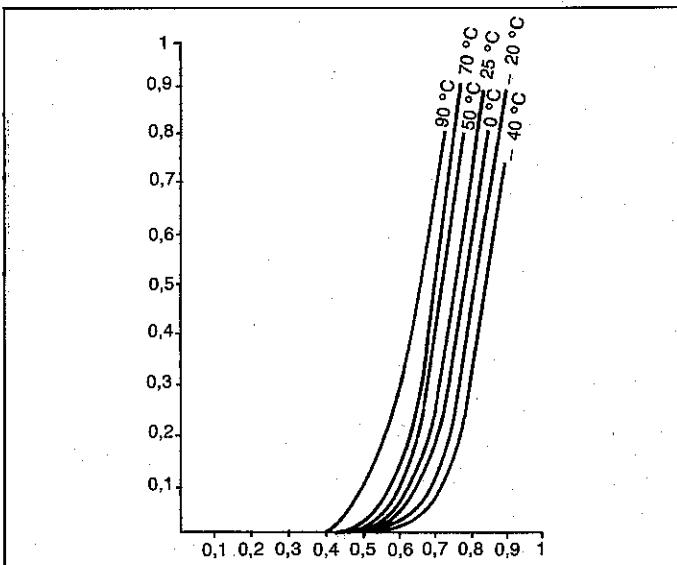


Figure 6: Caractéristique I/V de la diode Schottky

Une des plus simples d'entre elles est sans doute l'antenne résonante rectangulaire ou «Patch» (fig. 10 A). Son étude théorique peut suivre deux démarches: le modèle de la ligne de transmission et celui de la cavité.

### Modèle de la ligne de transmission (fig. 10 B)

Dans cette analyse, on modélise le rectangle par deux fentes rayonnantes parallèles de longueur  $a$ , de largeur proche de  $h$  (épaisseur du substrat) séparées par une ligne de transmission de faible impédance caractéristique et de longueur  $b$ . En négligeant la dissymétrie apportée par la ligne d'alimentation, les deux fentes sont identiques et leur admittance est de la forme:

$$Y_1 = Y_2 = G + jB \neq \frac{\pi a}{\lambda_0 Z_0} \{ 1 + j[1 - 0,636 \operatorname{Log}(\kappa h)] \}$$

où  $Z_0$  est l'impédance de l'air (120  $\Omega$ ) et  $\kappa$  vaut  $2 \pi/\lambda_0$

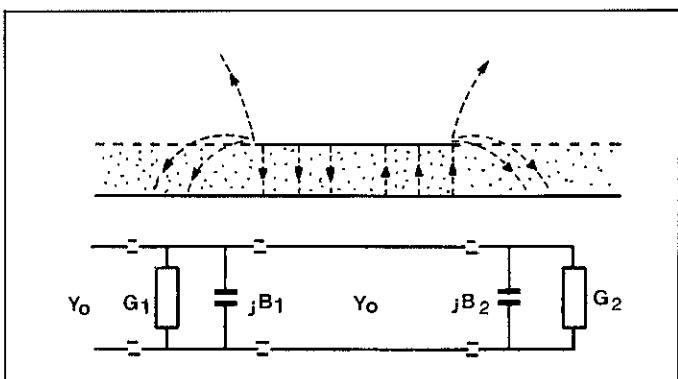


Figure 10 B: Modèle ligne de transmission

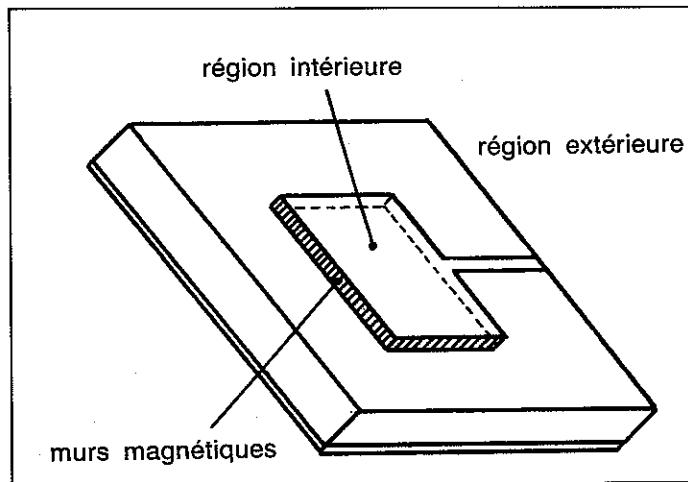


Figure 11: Modèle de la cavité

En supposant que seul le mode TEM est excité et que les modes supérieurs sont négligeables, le champ électrique est constant dans la direction parallèle aux fentes, et l'impédance caractéristique de la ligne est:

$$Y_0 = \frac{a\sqrt{\epsilon_r}}{hZ_0}$$

où  $\epsilon_r$  est la permittivité du substrat.

La longueur  $b$  de la ligne est calculée pour exciter les deux fentes avec un déphasage de  $180^\circ$ . Dans ces conditions, l'admittance d'entrée de l'antenne est purement réelle et vaut:

$$Y_e = 2 G = 2\pi a / \lambda_0 Z_0$$

### Modèle de la cavité (fig. 11)

Cette méthode consiste à assimiler l'antenne à une fine cavité fermée par des murs magnétiques, les régions internes et externes sont limitées par la projection du rectangle sur le plan de masse. En posant les mêmes conditions que précédemment, cette cavité est de mode TM et les parois sont de type:  
— électrique pour les faces supérieure et inférieure,  
— magnétique pour les faces latérales.

L'efficacité de l'antenne est quantifiée par un bilan des pertes: pertes métalliques dans les conducteurs, pertes par conduction dans le diélectrique et enfin les pertes de rayonnement de la cavité; ces dernières sont calculées en appliquant le principe d'équivalence: on substitue au champ dans le diélectrique des sources fictives réparties sur une surface  $S$  enveloppant l'antenne. Ces sources peuvent être magnétiques, électriques, ou les deux à la fois selon le type de surface choisie. Une seconde méthode consiste à calculer le rayonnement des courants de conduction et de leurs images électriques par rapport au plan de masse.

Ces méthodes permettent d'évaluer le champ rayonné à grande distance (encadré ci-dessous):

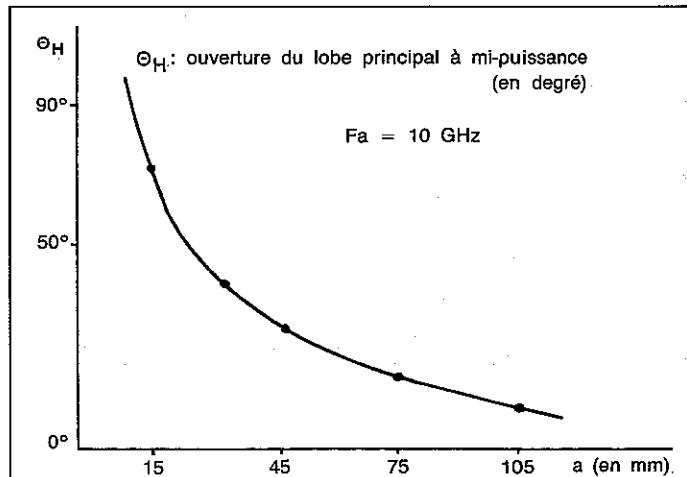


Figure 12: Ouverture d'antenne en fonction de a

On peut ainsi obtenir l'angle d'ouverture de l'antenne en fonction des dimensions du motif, fig. 12.

### Cas des antennes à réseau ou «multipatches»

La juxtaposition sur un même substrat de plusieurs antennes «patch» a pour effet de créer dans l'espace des zones d'interférence équivalentes à une focalisation. Ainsi on peut montrer que la directivité suivant un axe donné augmente avec le nombre de motifs élémentaires sur cet axe, mais dépend également de leur écartement et de leur phase d'excitation.

Si on considère plusieurs sources (antennes plaquées) espacées régulièrement les unes par rapport aux autres (fig. 13), la fonction caractéristique d'une telle configuration s'écrit, en termes de champs rayonnés:

$$f(\theta, \phi) = \frac{1}{nn'} \frac{\sin \frac{n\Psi}{2}}{\sin \frac{\Psi}{2}} \frac{\sin \frac{n'\Psi'}{2}}{\sin \frac{\Psi'}{2}}$$

Le champ électromagnétique rayonné par un tel réseau s'écrit alors, pour la direction  $\theta, \phi$ :

$$E = E_e f(\theta, \phi)$$

où  $E_e$  représente le champ rayonné par une antenne élémentaire,  $n$  et  $n'$  sont respectivement les nombres d'éléments suivant  $Ox$  et  $Oy$ , et où:

$$\Psi = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \cos \phi \cdot \sin \theta - \phi$$

$$\Psi' = \frac{2\pi d'}{\lambda_0} \sin \phi \cdot \sin \theta - \phi'$$

dans le plan H:

$$EQ = -j \frac{e^{ik_0 r}}{2\lambda_0 r} 4 V_0 a e \exp \left( j \frac{k_0 a \sin \theta}{2} \right) \cos \theta \frac{\sin \left( \frac{k_0 a}{2} \sin \theta \right)}{\frac{k_0 a}{2} \sin \theta} \cos (kh \cos \theta)$$

$$E\theta = 0$$

dans le plan E:

$$E\theta = -j \frac{e^{ik_0 r}}{2\lambda_0 r} 4 V_0 a e \exp \left( j \frac{k_0 b \sin \theta}{2} \right) \cos \frac{k_0 b \sin \theta}{2} \cos (kh \cos \theta)$$

$$EQ = 0 \quad \text{avec } k = k_0 \sqrt{\epsilon_r}$$

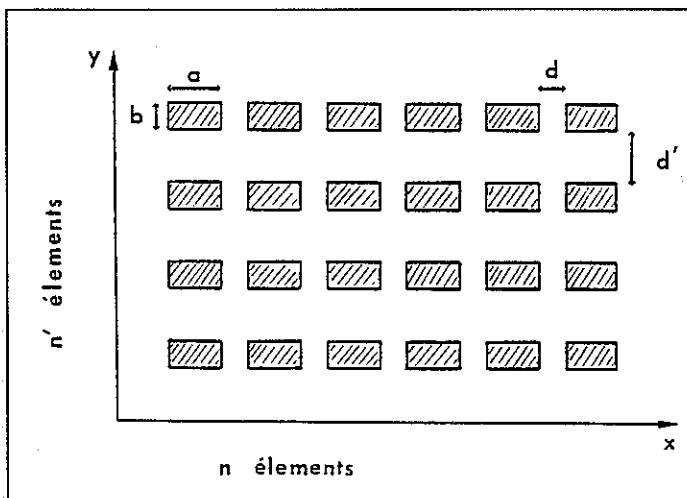


Figure 13: Antenne plaquée à éléments multiples

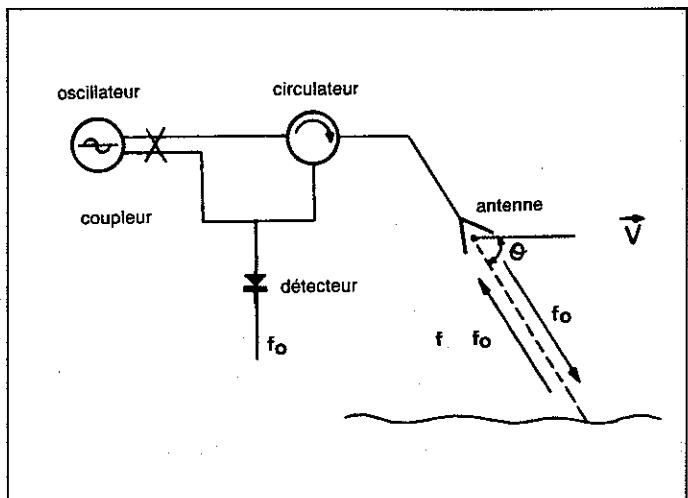


Figure 14: Obtention du signal Doppler

$d$  et  $d'$  étant les espacements intersources respectivement suivant  $Ox$  et  $Oy$ ,  $\phi$  et  $\phi'$  les déphasages intersources suivant  $Ox$  et  $Oy$ .

L'analyse de la fonction  $f(\theta, \phi)$  montre que plus  $n$  augmente, plus le lobe principal se rétrécit dans le plan H. Lorsque  $n'$  augmente, le même effet est obtenu dans le plan E.

Compte tenu de cette analyse, nous avons entrepris la réalisation d'une antenne plaquée à 16 éléments rayonnants, dont la modélisation a été faite à 10 GHz.

#### Caractéristiques de l'antenne à 16 éléments

La caractérisation est effectuée au moyen d'un analyseur de réseau automatique (HP 8555).

Les caractéristiques de l'antenne sont les suivantes:

- fréquence de résonance: 10,05 GHz,
- coefficient de réflexion:  $S_{11} = -25$  dB,
- bande passante à 3 db: 100 MHz.

Le relevé du diagramme de rayonnement montre une ouverture à mi-puissance de  $10^\circ$  dans le plan H et de  $11^\circ$  dans le plan E.

#### Application au cinémomètre à effet Doppler embarqué

Dans cette application, l'antenne est dirigée obliquement vers le sol (fig. 14) et le signal Doppler obtenu par mélange des ondes émises et reçue à une fréquence de la forme:

$$f_D = 2 f_0 \frac{V}{C} \cos \theta$$

où  $f_0$  est la fréquence émise,  $V$  la vitesse du mobile et  $\theta$  l'angle d'incidence par rapport au sol. La directivité de l'antenne intervient ici dans la dispersion  $\Delta\theta$  de l'angle  $\theta$  provoquant une dispersion en fréquence du signal Doppler.

Si l'antenne simple «Patch» se révèle trop peu directive, l'antenne à réseau ne convient pas non plus. En effet, étant directive dans les deux plans, elle ne permet pas la contribution d'un nombre suffisant de points du sol. Le juste compromis semble être l'antenne rideau: une antenne possédant un diagramme dissymétrique combinant une bonne directivité dans le plan vertical ( $\Delta\theta$  petit) et une ouverture suffisante dans l'autre plan.

Elle permet donc de recueillir l'information corrélée de nombreux points alignés du sol sous une incidence quasi-constante, donc avec une vitesse apparente identique. C'est cette solution qui a été retenue pour la maquette compte tenu de l'application d'origine qui était de viser des sols routiers ou les pistes de roulement du VAL. L'antenne choisie a une ouverture  $\Delta\theta$  de  $10^\circ$  dans le plan vertical et de  $80^\circ$  dans l'autre plan.

## Le traitement de signal

La contribution du Laboratoire de Radio-Propagation et Electronique de l'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois concerne le conditionnement et l'exploitation du signal issu de la détection de l'onde hyperfréquence représentatif de l'effet Doppler-Fizeau.

A la suite des études théoriques menées au sein du Centre Hyperfréquences et Semi-Conducteurs sur les propriétés statistiques du signal, nous nous sommes efforcés depuis près de 2 ans à nous équiper d'outils permettant de travailler dans cette direction.

Nous avons à notre disposition:

- un banc équipé d'un tapis roulant, recouvert de cailloux d'un développement de 2,5 m entraîné par un moteur dans une gamme vitesse allant de 1 à 10 m/s. Ce banc a été réalisé par le Centre de Recherches et d'Evaluation des Systèmes de Transports Automatisés;
- un système hyperfréquence nous donnant le signal Doppler et décrit précédemment.

Nous avons réalisé:

- un système d'amplification basse fréquence à faible bruit et de mise en forme avec hystérisis pour s'affranchir du bruit et des instabilités au moment des commutations ayant un des seuils situé au niveau zéro de manière à avoir un des fronts de commutation le plus représentatif de la période du signal malgré les variations de celui-ci;
- un dispositif microinformatique numérisant en temps réel la durée de chaque période Doppler et la stockant en mémoire vive (1 024 périodes consécutives peuvent être ainsi mesurées);
- un miniordinateur permettant ensuite de récupérer ces informations, à sa cadence propre, par une liaison RS 232 C.

Nous avons alors développé des logiciels d'exploitation afin:

- de pouvoir présenter d'une part la durée de chaque période en fonction de son numéro, ce qui donne une allure générale du phénomène (fig. 15), d'autre part la densité de probabilité (fig. 16) ainsi que la fonction de répartition;
- de pouvoir calculer l'écart type et différents paramètres permettant de caractériser les antennes mises à notre disposition.

Parallèlement à celà, nous avons développé un algorithme basé sur le caractère statistique de la durée de chaque période Doppler de manière à définir une durée moyenne de période Doppler la plus représentative de la vitesse du déplacement.

Cet algorithme devant être exécuté en temps réel entre 2 périodes Doppler consécutives même aux plus grandes vitesses, a été particulièrement étudié dans l'optique d'une très grande rapidité d'exécution.

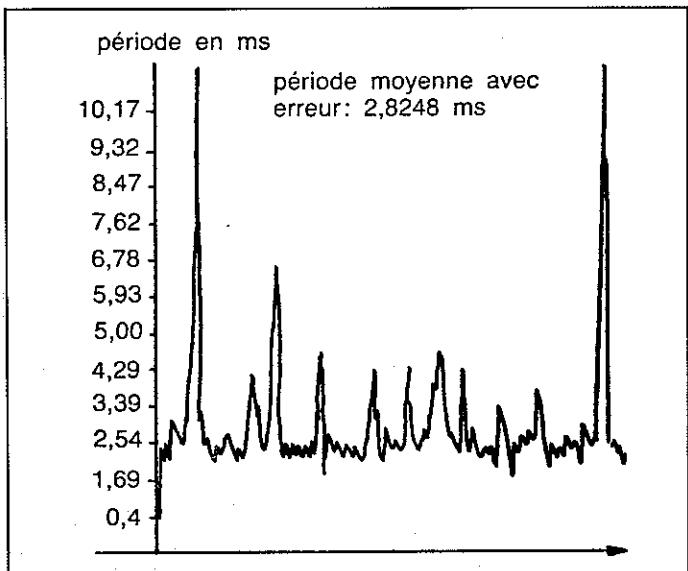


Figure 15: Durée des périodes

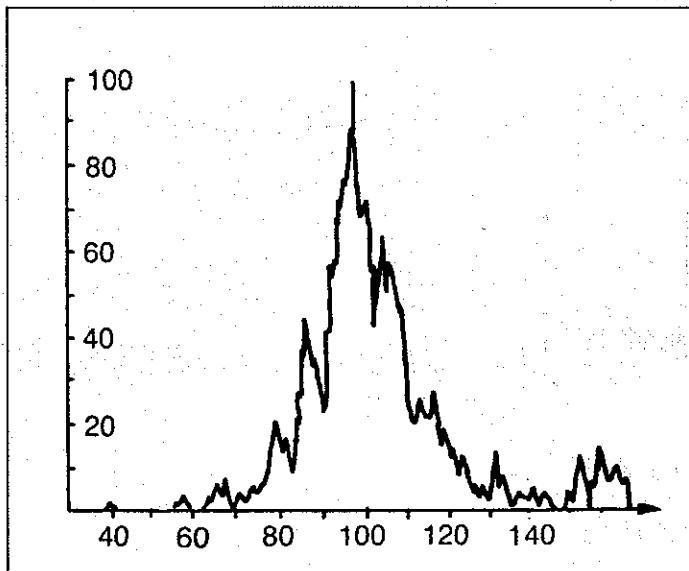


Figure 16: Densité de probabilité (par rapport à la vitesse moyenne)

De cette maquette sortira par liaison série une information de durée moyenne la plus vraisemblable de la période Doppler pendant un temps donné: à partir de cette information nous pourrons calculer la vitesse et la distance parcourue par un véhicule.

La partie analogique et microinformatique de cette maquette est de faible consommation et de coût modéré.

De plus, un développement en série permettrait d'envisager l'emploi de techniques de «circuits à la demande» à très haute

densité d'intégration, ce qui réduirait considérablement le volume et augmenterait la fiabilité.

Enfin, étant donné les variations instantanées très importantes du niveau du signal Doppler, nous avons développé un système informatique original de commande automatique de gain permettant de limiter ces variations.

L'algorithme de traitement de périodes et le dispositif de commande de gain sont destinés à être implantés sur la maquette.

## Réalisation de la maquette du cinémomètre

### Description de la maquette

Cette maquette comprend deux parties principales: le boîtier capteur, robuste, destiné à être monté sous le véhicule et comprenant le capteur micro-onde, le traitement de signal et les alimentations. Un second boîtier lui est raccordé et sert à l'affichage à bord du véhicule.

La Société SINTRA a été associée à ce stade du projet pour la réalisation d'une partie du traitement de signal et des alimentations en circuits hybrides, ainsi que pour la réalisation mécanique du boîtier.

### Assemblage du capteur micro-onde en circuit hybride

Dans l'intérêt du moindre coût, l'ensemble capteur micro-onde a été implanté sur le circuit même de l'antenne; il comprend: la source d'émission, le duplexeur émission-réception et le détecteur de réception (fig. 17).

Dans le but de lancer rapidement l'étude du traitement de signal grâce à des expérimentations, une source NEC à 10 GHz a été montée sur l'antenne rideau en remplacement de la source intégrée 7,4 GHz.

Le duplexeur est formé d'un anneau hybride. Cette solution a été préférée à celle d'un circulateur à ferrite plus coûteux et fragile.

Le détecteur comprend une diode Schottky et un coupleur ramenant sur la diode une partie du signal d'émission nécessaire au mélange.

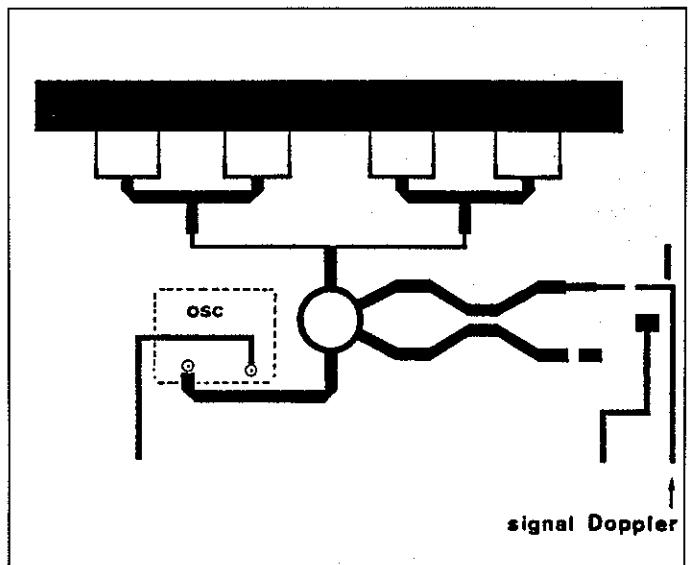


Figure 17: Capteur micro-onde

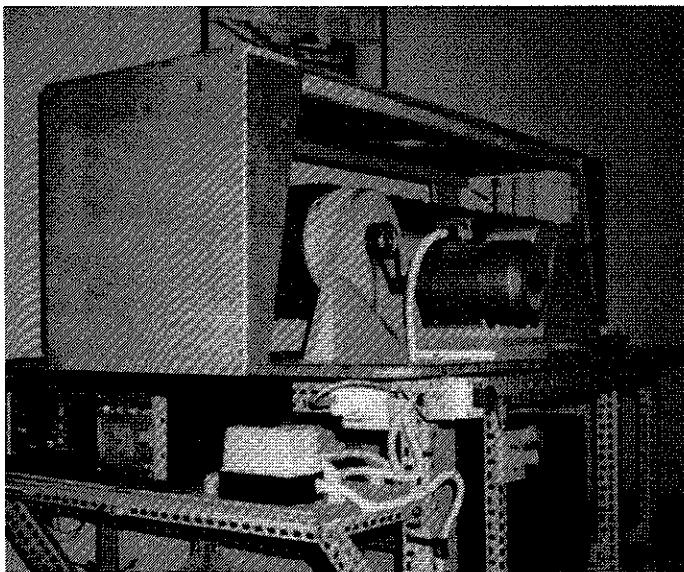


Figure 18: Banc d'essai

### Le banc d'essai et ses résultats

Pour faciliter la mise au point et l'étalonnage des capteurs cinémométriques, le CRESTA (Centre de Recherche et d'Evaluation des Systèmes de Transports Automatisés) a réalisé un banc d'essai sous la forme d'un tapis roulant revêtu de cailloux et recréant le défilement du sol sous le capteur (fig. 18).

Ce tapis est piloté par un microprocesseur permettant de lui faire suivre des programmes de vitesses en fixant la pente et la vitesse de palier; l'information de vitesse du tapis est prélevée par capteur optique.

Un autre tapis revêtu d'une maille métallique fine est prévu pour modéliser les applications du cinémomètre sur voies métalliques.

Les essais sur le banc ont permis de valider l'antenne rideau pour les applications routières; la figure 19 présente les valeurs comparées du capteur Doppler et du capteur optique.

On peut constater que l'accord est réalisé à 1% près dans la gamme de vitesse de 0,5 à 8 m/s.

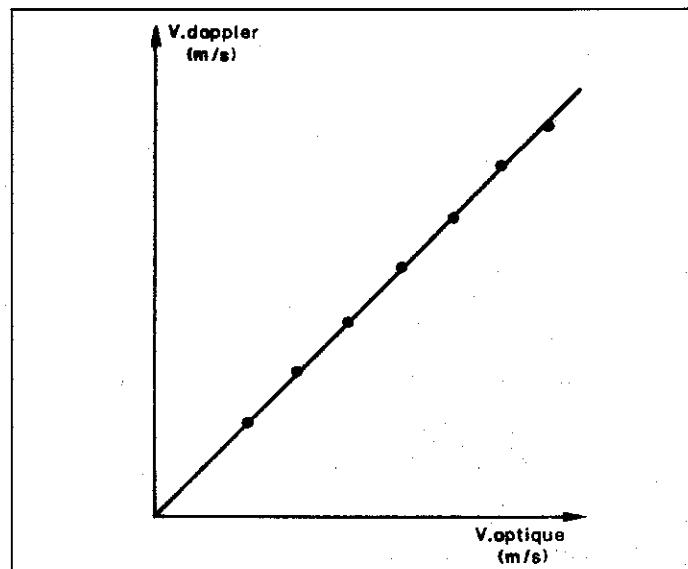


Figure 19: Comparaison des mesures optiques et Doppler

### Essais sur site extérieur

Des essais routiers ont eu lieu avec la maquette; ils ont montré un bon accord des mesures de vitesse entre le compteur et le cinémomètre, mais n'ont qu'un caractère qualitatif par manque d'étalonnage.

Des essais ont eu également lieu sur les pistes de roulement du VAL. Tout d'abord, l'antenne fut disposée normalement, visant obliquement le milieu des pistes. Cette zone médiane étant très hétérogène, le niveau reçu subissait de brusques sauts, cependant la mesure de vitesse restait assez stable.

Puis l'antenne fut placée horizontalement de façon à pointer le rail d'énergie, c'est à la fois une zone plus homogène et un support comparable aux voies ferrées. Cette fois, le signal était fort et régulier, mais l'antenne, très ouverte de part et d'autre du rail, recevait des échos parasites venant des quais et de pylônes divers, ce qui perturbait la mesure par endroits.

Aux vues de ces résultats, il semble que l'antenne rideau soit bien adaptée aux sols routiers mais qu'une antenne plus directive de type réseau serait plus adaptée aux applications sur rail métallique.

## Conclusion

On peut estimer que le prototype routier du cinémomètre est dans sa phase finale, cependant certains problèmes restent à résoudre:

- la fréquence de la source intégrée à transposer à 10 GHz,
- la sensibilité au défaut d'assiette inhérent à la mesure oblique. Une solution existe néanmoins à partir d'un montage «Janus», mettant en jeu 2 têtes symétriques par rapport à un plan vertical,
- enfin certains problèmes liés à la rétrodiffusion du sol dans des conditions climatiques difficiles. Ceci fait l'objet d'une recherche particulière au sein du LRPE.

En revanche, le cinémomètre ferroviaire n'en est qu'à son début. Les principaux points critiques du cahier des charges SNCF sont:

- l'indication du sens de marche,
- la précision en distance (1 m pour 1 000m),
- l'insensibilité aux erreurs d'assiette (5°),
- l'insensibilité aux conditions climatiques difficiles (neige),
- la mise en sécurité.

Ces différents points seront abordés dans la suite du projet.

## RÉFÉRENCES

1. *Etude et réalisation d'un cinémomètre à effet Doppler* (Delgutte J.P.). Mémoire CNAM Lille, décembre 1980.
2. *Développement d'un cinémomètre à effet Doppler* (Deloof P.). Rapport GRRT n° 1984-94, Lille, octobre 1984.
3. *Etude et réalisation d'un oscillateur Bande X monolithique à TEC As Ga* (Mascart F.). Mémoire CNAM, Lille, juin 1984.
4. *Développement d'antennes plaquées en bande X* (Kassi-Lahlou M.). Rapport de DEA, Lille, juillet 1984.
5. *Etude et réalisation d'antennes plaquées, application: réalisation d'un cinémomètre Doppler intégré* (Safrioui A.). Thèse Université de Lille, décembre 1986.

## RAPPEL DES ARTICLES PARUS EN 1986 DANS RTS

RTS n° 9-10 juin 1986  
La sécurité routière à l'INRETS

Insécurité routière: le coût socio-économique des dommages corporels  
*Hubert DUVAL*

L'étude détaillée d'accidents: une nouvelle orientation des recherches en sécurité routière  
*Francis FERRANDEZ, Dominique FLEURY, Gilles MALATERRE*

L'analyse de la tâche de conduite appliquée à l'étude détaillée d'accidents  
*Gilles MALATERRE, Jean-François PEYTAVIN*

La vitesse: son image et son usage, le point de vue du psychologue  
*Pierre-Emmanuel BARJONNET, Farida SAAD*

Les poids lourds dans les accidents de la circulation  
— Etude du risque d'implication en fonction des habitudes de travail et de conduite des conducteurs  
*Patrick HAMELIN*

Le colloque Evaluation 85

L'accès à la conduite automobile  
*Françoise CHATENET*

L'analyse des accidents dans la perspective de la sécurité secondaire  
*Michelle RAMET, Gilles VALLET*

Les études sur la tolérance humaine aux chocs  
*Jean-Pierre VERRIEST, André CHAPON, Dominique CESARI, Michelle RAMET*

Historique des travaux de l'ONSER consacrés au rôle de l'alcool dans les accidents

Le Conseil International de Recherche sur la Biocinétique des Chocs (IRCOBI)

Peut-on mieux protéger les piétons en agissant sur la conception des voitures  
*Dominique CESARI, Claude CAVALLERO*

Sécurité des enfants passagers d'automobiles  
*Maryvonne DEJEAMMES, Roger BIARD, Jean-René CARRE, Brigitte CAMBON de LAVALETTE*

Régulation du trafic et sécurité aux carrefours  
*Simon COHEN*

Effets de la réglementation sur les comportements: le cas de la priorité aux ronds-points  
*Christian TETARD*

Les équipements et aménagements routiers de sécurité  
*Robert QUINCY, Dominique VULIN*

Les moyens d'essais du Laboratoire des Chocs et de Biomécanique de l'INRETS  
*Michel FERLAY*

La recherche en sécurité routière dans les pays en développement  
*Nicole MUHLRAD*

RTS n° 11 septembre 1986

Une expérience de prévision de trafic menée en commun par quatre pays: l'étude des liaisons par trains à grande vitesse  
Paris-Bruxelles-Cologne-Amsterdam  
*Olivier MORELLET*

Une approche «système expert» du traitement de la saturation  
*Bernard FORASTE, Gérard SCEMAMA*

Mobilité et équipement des ménages: quelques enseignements issus d'enquêtes statistiques nationales  
*Jean-Pierre ORFEUIL, Laurent HIVERT, Patrick TROULAY*

Le système hectométrique S.K.  
*Claude SOULAS*

PHEDRE: un outil d'évaluation des conditions de circulation en ville  
*Simon COHEN, Medhi DANECH-PAJOU*

Nuisances sonores et coût social de l'automobile  
*Jacques LAMBERT*

Les enjeux de la privatisation des transports urbains en Tunisie  
*Xavier GODARD*

RTS n° 12 décembre 1986

Analyse de la responsabilité présumée dans un accident de la route, telle qu'elle apparaît à travers le codage effectué par les forces de police  
*Hélène FONTAINE*

Temps de réponse et manœuvres d'urgence  
*Gilles MALATERRE*

Séquences cinématiques représentatives du trafic automobile français  
*Robert JOUMARD*

Places-formes de fret, centres de logistique, ports secs  
*Paul HANAPPE*

Les chaînes de transport; exploitation de l'enquête auprès des chargeurs  
*Elisabeth GOUVERNAL*

Sensibilité du corps humain aux vibrations: filtre de pondération  
*Georges BONNARDEL*