

LE 127 - 071006

48<sup>e</sup> CONGRES INTERNATIONAL  
BUDAPEST 1989



RAPPORT 3

2875

COMITE INTERNATIONAL DES METROPOLITAINS

L'automatisation intégrale des métros

UITP  
UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS  
AVENUE DE L'URUGUAY 19  
B-1050 BRUXELLES

## RESUME

### L'AUTOMATISATION INTEGRALE DES METROS

Le développement de l'automatisation intégrale des métros a marqué la décennie 1980, et les années 90 verront cette tendance se poursuivre. Les premières réalisations permettent aujourd'hui d'appréhender de manière pragmatique les problèmes que pose l'automatisation de l'exploitation.

L'acceptation par le public de l'absence de personnel embarqué, conjuguée au très bon niveau de fiabilité et de disponibilité des automatismes sont encourageants. La présence de moyens de communication internes au système réduit par ailleurs les risques d'insécurité.

L'atout maître du métro automatique est la diminution des coûts d'exploitation due à l'absence de personnel de conduite. Reste à établir une méthodologie destinée à réaliser des comparaisons économiques détaillées lors de la transformation d'un système. Une bonne gestion prévisionnelle des effectifs permet, dans ce cas, de résoudre les problèmes de personnel susceptibles d'apparaître.

L'automatisation intégrale apporte à la clientèle une qualité de service (renforcement de la sécurité, souplesse de l'exploitation, adaptation permanente de l'offre à la demande) et au personnel des tâches enrichies.

Trois autres contributions viennent compléter le rapport de M. H. Frey (Paris).

M. Lombart (Bruxelles) présente les travaux réalisés par le Comité des Métros de l'UITP pour étudier les méthodologies d'automatisation progressive des lignes existantes.

M. Döpfer (Berlin) décrit les nouveaux projets d'automatisation en cours en Allemagne.

Le professeur Gabillard traite des rôles respectifs des automatismes et des facteurs humains dans la genèse des accidents, et conclut à la meilleure fiabilité procurée par l'automatisation.

### AVIS

*Le Secrétariat Général ne disposant pas au Congrès d'exemplaires de réserve, les membres sont instamment priés de se munir du présent rapport*

UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS

Avenue de l'Uruguay 19, B-1050 Bruxelles

Téléphone: + 32 2 673 33 25 - 673 04 66    Téléfax: + 32 2 660 10 72    Télex: 046 + 63916

LA REPRODUCTION DES PUBLICATIONS ÉDITÉES PAR L'UNION INTERNATIONALE  
EST INTERDITE SAUF ENTENTE AVEC LE SECRÉTAIRE GÉNÉRAL

© Copyright 1989 Union Internationale des Transports Publics  
Tous droits de reproduction, de traduction et d'adaptation réservés

# L'automatisation intégrale des métros

## TABLE DES MATIERES

	Page
Préface . . . . .	3
<i>Première partie :</i> <b>Réalisations et développements</b> . . . . .	4
Par Henri FREY, Président-Directeur Général de COMELI, Directeur à VIA Transexel, Paris (France)	
<i>Deuxième partie :</i> <b>Méthodologie dans l'approche de l'automatisation dans les réseaux existants</b> . . . . .	10
Synthèse des travaux effectués par le Groupe de travail « Automatisation » du Sous-Comité Exploitation du Comité international des métros (CIM)  Par Antoine LOMBART, Directeur de l'Exploitation, Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles, Bruxelles (Belgique), Président du Sous-Comité Exploitation du CIM	
<i>Troisième partie :</i> <b>Nouveaux projets d'automatisation pour l'exploitation de rames sans conducteur dans les transports publics urbains sur rail</b> . . . . .	19
Par Helmut DÖPFER, Dipl.-Ing., Geschäftsleiter Technik und Bau, Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG), Berlin (Allemagne)	
<i>Quatrième partie :</i> <b>Automatismes et facteurs humains dans la genèse des accidents</b> . . . . .	26
Par Robert GABILLARD, Professeur, Université de Lille I (Université des Sciences et Techniques de Lille), Villeneuve d'Ascq (France)	
<i>Cinquième partie :</i> <b>Conclusions</b> . . . . .	33
Par Hans-Hermann MEYER, Prof., Dipl.-Ing., Vorstandsmitglied, Hamburger Hochbahn AG, Hambourg (RF Allemagne), Président du Comité international des métros de l'UITP	

## PREFACE

Le Comité international des métros présente au 48<sup>e</sup> Congrès de l'Union internationale des transports publics qui se tient à Budapest en 1989 un rapport en quatre parties traitant des différents aspects de l'automatisation des métros.

A la suite de ces rapports, d'importants résultats sont récapitulés et présentés sous forme de conclusions sans anticiper sur les recommandations qui résulteront des travaux du Congrès.

# Première partie : Réalisations et développements

PAR

Henri FREY,

Président-Directeur Général de COMELI, Directeur à VIA Transexel, Paris (France)

## 1 Le développement de l'automatisation intégrale est un fait marquant de la décennie 1980

Depuis de nombreuses années, les réseaux de métros urbains des grandes métropoles ont étudié et mis en œuvre, avec succès, des systèmes de conduite automatique qui aident ou relayent les conducteurs des trains, sans toutefois les remplacer complètement.

Parallèlement des expériences réussies de transport public de voyageurs par des systèmes totalement automatisés, sans aucun personnel à bord des trains, ont été réalisées depuis le début des années 70. On peut citer notamment aux Etats-Unis la desserte de l'Université de West Virginia et de la Ville de Morgantown et en dehors des sites urbains, la desserte interne de nombreux aéroports et de parcs d'exposition. Après des débuts difficiles, ces systèmes dont les performances techniques sont insuffisantes pour des dessertes urbaines, ont atteint des niveaux de qualité de service très acceptables.

Les développements de l'automatisme dans les systèmes de transports urbains se sont considérablement amplifiés dans les années 80 notamment par la mise en service de métros totalement automatisés.

Deux villes, Lille en France en 1983, puis Vancouver au Canada en 1986 ont mis en service des lignes de métro urbain totalement automatiques, sans aucun personnel à bord des trains, qui constituent l'ossature principale de leur réseau. Après sa première ligne de 13 km en 1983, Lille a ouvert sa seconde ligne de 13 km en 1989. Vancouver prolonge également en 1989 de 6 km sa première ligne de 21 km ouverte en 1986.

Miami, aux Etats-Unis, a mis en service en 86 une courte ligne de desserte du centre ville (DPM) totalement automatique en correspondance avec la

ligne principale de métro. Londres a mis en service en 1987 une nouvelle ligne équipée d'un système de conduite totalement automatique, exploitée avec un chef de train à bord de chaque train. Des villes japonaises, notamment Kobe, Osaka, Komaki, Chiba, Yokohama ont également construit des lignes, en général périphériques, équipées de systèmes de conduite totalement automatiques, exploitées, suivant les villes, avec ou sans personnel à bord des trains.

Des dessertes moins importantes, mais cependant significatives du développement de l'intérêt des villes pour l'automatisme intégral, ont été réalisées, par exemple à Détroit, Jacksonville et Dallas aux Etats-Unis, à Toronto au Canada, à Laon en France, à Sidney et Brisbane en Australie. Enfin, dans le domaine des aéroports, les navettes totalement automatiques continuent à se développer avec des systèmes qui techniquement appartiennent à la famille des systèmes totalement automatiques de transport de voyageurs.

Les années 90 verront les développements de l'automatisme intégral se poursuivre. De nombreuses villes ont déjà engagé la construction de lignes totalement automatisées, destinées à être exploitées sans personnel embarqué: Lyon, Paris et Toulouse en France, Okinawa et Tama au Japon, Taïpei à Taïwan. D'autres ont pris des décisions de principe comme Bordeaux, Genève, Strasbourg.

Dès aujourd'hui on peut estimer à près d'un million de voyageurs par jour la clientèle transportée par des systèmes totalement automatisés, sans personnel d'exploitation à bord des trains. Les analyses présentées dans ce rapport s'appuient principalement sur les résultats disponibles d'exploitation des systèmes existants et sur un questionnaire diffusé à tous les réseaux de l'UITP membres du Comité international des métropolitains.

## 2 Les problèmes posés par l'automatisation intégrale de l'exploitation sont maintenant appréhendés à la lumière des réalisations qui existent depuis 1983

Il peut être utile de rappeler que l'automatisation intégrale de l'exploitation de métros en milieu urbain, et tout particulièrement en souterrain, était en général considérée dans les années 70 par le milieu professionnel comme une utopie dangereuse. Faire circuler des trains de voyageurs sans personnel de conduite ou d'accompagnement apparaissait à la plupart des exploitants comme impossible, particulièrement en tunnel.

Les réticences qu'aurait le public à monter dans les trains sans personnel, les défaillances des automa-



Fig. 1: La VAL à Lille sur une section en viaduc.

tismes qui risquaient d'entraîner de nombreux arrêts de l'exploitation, les difficultés qu'aurait le personnel pour gérer les incidents et les accidents éventuels ainsi que pour lutter contre le vandalisme et la violence, les coûts d'investissement et de développement constituaient autant de barrières et de bonnes raisons pour refuser l'aventure de l'automatisme intégral, sans parler des réticences des autorités politiques et des syndicats ouvriers en face de systèmes automatiques dont l'exploitation nécessite moins d'emplois qu'un système traditionnel. L'avantage économique que procurait l'absence de conducteurs, principal avantage attendu de l'automatisation intégrale ne paraissait pas de nature à contre-balancer ces inconvénients.

Pourtant la fiabilité et les performances techniques des automatismes offraient à l'évidence des perspectives de remplacement du travail des conducteurs de métro, souvent réduits à un rôle bien monotone de presse-boutons et d'amélioration du service à la clientèle. C'est pourquoi dès 1971 Transexel s'est intéressé au projet de métro automatique de Matra, à Lille. En 1979 ces deux sociétés ont créé ensemble la Compagnie du Métro de Lille pour préparer la mise en service de ce métro et en assurer l'exploitation commerciale à partir de 1983.

Le succès commercial et technique immédiat du VAL à Lille, dès sa mise en service, puis celle du Skytrain à Vancouver trois ans plus tard, ont fourni des réponses à ces objections en produisant des résultats expérimentaux en grande réelle. Les problèmes peuvent maintenant être appréhendés de manière concrète et pragmatique, et les opinions sur les principaux aspects de l'automatisation intégrale avec absence totale de personnel à bord des trains ont évolué considérablement à la lumière de la réussite de ces deux exploitations pilotes.

## 2.1 *L'attitude du public à l'égard des trains sans personnel embarqué*

Les comportements observés à Lille puis à Vancouver ont d'emblée confirmé les observations constatées dans les autres systèmes automatiques (aéroports, etc.) : le public ne manifeste aucune réticence particulière. Malgré des périodes de lancement commercial, qui sont en général marquées par une importante information, il arrive couramment que des clients ne remarquent pas l'absence de personnel à bord des trains.

Complétant la vidéo-surveillance des stations et des zones de manœuvre, les systèmes de communications mis en place pour permettre à tout moment aux voyageurs d'entrer en relation avec les agents du poste central de contrôle et réciproquement se sont révélés efficaces et suffisants pour que les voyageurs se sentent en sécurité. De même la disponibilité vis-à-vis des voyageurs des personnels itinérants en ligne a permis de créer un climat de confiance entre les voyageurs et le métro qui renforce ce sentiment de sécurité. En employant moins de personnel qu'un métro traditionnel, un métro automatique peut ainsi offrir une meilleure communication entre la clientèle et l'entreprise de transport.

Bien que l'appréhension du public face à des trains sans personnel reste citée comme une de leurs raisons par certains réseaux qui rejettent actuellement l'automatisation intégrale, un grand nombre de réseaux parmi lesquels bien sûr ceux qui ont décidé de mettre

en service des lignes totalement automatisées estiment maintenant que le public acceptera facilement l'absence de personnel embarqué dans les trains.

## 2.2 *La fiabilité de fonctionnement des automatismes*

Les premiers systèmes automatiques des années 70 ont connu de sérieuses difficultés de démarrage. Certains, comme celui de Morgantown, ont même failli être démolis. Maintenant la technologie a évolué et les techniques sont bien maîtrisées par les industriels, et les démarrages commerciaux des métros totalement automatiques ont démontré que les matériels actuels sont suffisamment fiables pour fournir une excellente qualité de service.

Les incidents sont rares, les personnels présents au poste de contrôle et en ligne en assurent la gestion sans difficultés particulières. Là où les chiffres de disponibilité sont connus, comme à Lille, ils sont supérieurs aux objectifs fixés par référence aux métros traditionnels.

Il se confirme bien ainsi que la fiabilité des automatismes est supérieure à celle des opérateurs particulièrement pour les tâches répétitives comme la conduite sur un site propre urbain.

Aucun des réseaux interrogés ne formule de réserve sur la disponibilité et la fiabilité des automatismes. Pour fournir une disponibilité opérationnelle de haut niveau, les équipements critiques sont souvent doublés, ce qui permet en cas de panne de poursuivre l'exploitation sans perturbation sensible pour la clientèle, par une simple télécommande de commutation de l'équipement hors d'usage vers l'équipement qui le double.

Quand il s'agit de choisir entre plusieurs systèmes, les critères de choix techniques le plus souvent cités par les réseaux intéressés concernent essentiellement les modalités de traitement des pannes en ligne et le service des portes pendant les échanges de voyageurs entre les trains et les quais.

Les portes palières automatiques comme celles du VAL à Lille offrent une sécurité totale pour le service des voyageurs. Elles permettent des économies sur la largeur des quais, elles isolent les circulations d'air du tunnel et des stations, elles éliminent toute possibilité de suicide ou d'accident, elles interdisent tout accès à la voie depuis les quais, elles améliorent sensiblement le confort sur les quais, mais elles demandent une infrastructure spécifique, notamment pour les stations aériennes.

Les systèmes que l'on peut mettre en place pour protéger les voies, en l'absence de portes palières, risquent d'augmenter le nombre d'incidents d'exploitation et ne permettent pas d'éliminer les suicides ou les accidents venant de bousculades sur les quais au moment du passage des trains. La sécurité peut rester à un niveau comparable à celui d'un métro traditionnel, mais tout le confort et le supplément de sécurité qu'apportent les portes palières sont alors perdus.

## 2.3 *Lutte contre le vandalisme et la violence*

L'absence de personnel à bord des trains, souvent combinée à l'absence de personnel permanent dans les stations, pourrait faire craindre un développement particulier du vandalisme et des agressions.

L'expérience de Lille, comme celle de Vancouver, montre qu'un système bien équipé en moyens de communication est puissamment armé pour résister au vandalisme et dissuader les agressions.

Rappelons, pour illustrer cette puissance, que toutes les voitures du métro lillois par exemple possèdent un interphone sur chaque plate-forme, que tout appel à l'un de ces interphones entraîne l'arrêt du train à la station suivante si un opérateur du PC n'a pas acquitté l'appel, que les opérateurs peuvent à tout moment conduire un train portes fermées jusqu'à un terminus ou à la station où sont stationnés les policiers affectés au métro. Ces possibilités ont été utilisées à quelques occasions, et leur caractère dissuasif a visiblement rapidement été connu des agresseurs et vandales potentiels.

Bien sûr, il existe quelques manifestations de violence ou de vandalisme qu'il faut, comme partout, traiter rapidement pour en limiter les conséquences. Mais l'importance de ces incidents, quantitativement difficile à mesurer, reste à un niveau marginal qui n'altère ni l'image de marque ni la qualité générale de l'ambiance des voitures et des stations.

Les risques de vandalisme et de violence sont cités comme arguments par certains des réseaux qui actuellement refusent d'adopter l'automatisme intégral. Cependant on remarque que malgré des effectifs d'exploitation moins importants que les métros traditionnels les métros de Lille ou de Vancouver connaissent des niveaux de vandalisme et de violence très acceptables et favorablement comparables aux autres réseaux, et nettement inférieurs à ceux des réseaux d'autobus qui les entourent.

## 2.4 Les économies d'investissements et d'exploitation

Presque tous les réseaux admettent que la suppression des conducteurs conduit à une diminution des coûts d'exploitation.

Au sujet des investissements, les opinions sont très partagées et la crainte de coûts d'investissements importants est également souvent citée par les réseaux qui n'envisagent pas une automatisation intégrale de l'exploitation. Pour obtenir une capacité de transport donnée, les fréquences permises par l'automatisation intégrale sont supérieures à celles de la conduite manuelle, il est donc possible pour de nouvelles lignes de réaliser des économies significatives de génie civil en diminuant le gabarit des ouvrages.

Le seul réseau qui actuellement construit une ligne automatique facilement comparable à des lignes traditionnelles existantes est le réseau de Lyon qui a pris la décision d'automatisation de sa quatrième ligne en fonction d'études économiques prenant en compte les coûts d'investissement et les économies d'exploitation. La décision d'automatiser totalement la ligne D par le système MAGGALY a été prise pendant la construction de la ligne, alors que le génie civil et la construction des trains étaient largement engagés. Les surcoûts d'investissement dus à la décision d'automatiser complètement la ligne D de Lyon ne permettent malheureusement pas d'évaluer avec suffisamment de précision ce qu'auraient été, dans un processus de décision plus classique, les coûts d'investissement d'une ligne conçue en automatisme intégral dès l'origine.

Cependant le simple fait que l'automatisme intégral autorise sur la ligne D une augmentation sensible des fréquences par rapport à l'exploitation traditionnelle avec conducteur des lignes A et B permettra à MAGGALY de faire passer dans les tunnels et les stations de la ligne D de Lyon un trafic de pointe nettement plus important que dans ceux des lignes A et B, construits au même gabarit.

Pour les coûts d'exploitation, le réseau de Lyon estime que le gain apporté par l'automatisme intégral représente environ 20 % du coût d'une exploitation traditionnelle. Le Sous-Comité Exploitation du Comité international des métropolitains, qui s'intéresse activement depuis 1982 aux différents aspects de l'automatisation intégrale de l'exploitation, a pour l'instant renoncé à une première tentative d'uniformisation des méthodes d'évaluation du rapport coût/bénéfice pour comparer les projets des trois réseaux de Berlin, Hambourg et Lyon. Les différences entre les structures de réseaux et entre les caractéristiques physiques et opérationnelles des lignes rendent en effet difficiles les tentatives de création d'indicateurs chiffrés représentatifs acceptés par tous.

La méthodologie pour réaliser des comparaisons économiques détaillées sur des bases généralement acceptées comme représentatives reste à élaborer, bien qu'il apparaisse nettement qu'un métro totalement automatisé revient, à capacité égale, moins cher en investissement et en exploitation.

## 2.5 Les effectifs du personnel

L'automatisation intégrale de l'exploitation de lignes existantes risque de poser des problèmes de diminution d'effectif. Bien préparée, cette opération ne devrait pas être plus difficile que le passage pour l'exploitation des autobus de 2 à 1 agent, résolue sans difficultés majeures par de très nombreux réseaux dans le monde.

La création d'une nouvelle ligne de métro entraîne en général des créations de postes de travail. Ses répercussions sur le réseau de surface peuvent entraîner des problèmes de réductions d'effectifs, accentués éventuellement pour une ligne totalement automatisée qui demande pour certains personnels des qualifications nouvelles, différentes de celles des personnels touchés par une diminution des services du réseau d'autobus. Une bonne gestion prévisionnelle des effectifs permet de résoudre ces problèmes, dont la contrepartie au plan général est un enrichissement des tâches.

De nombreux réseaux citent naturellement cette difficulté parmi les freins à l'automatisation intégrale, mais ici encore on remarquera que les réseaux qui exploitent ou se préparent à exploiter des lignes totalement automatisées ont résolu ces problèmes sans difficultés majeures grâce à une bonne préparation des conditions de mise en service de ces lignes.

## 3 L'automatisation intégrale de l'exploitation permet d'offrir à la clientèle une qualité de service tout à fait remarquable et au personnel des tâches valorisantes

Les réalisations existantes à Lille et Vancouver sont très généralement reconnues comme ayant ap-

porté aux clients du métro des progrès très appréciables en termes de sécurité, de souplesse d'exploitation, de qualité de service, d'image de marque pour les transports collectifs. Le personnel d'exploitation bénéficie pour sa part de tâches plus intéressantes, plus motivantes.

### 3.1 La sécurité

Il est reconnu de plus en plus généralement dans tous les systèmes industriels que les processus intégralement automatisés offrent un degré de sécurité supérieur aux processus manuels équivalents.

Les enquêtes menées sur de récents accidents dans le monde des transports confirment le plus souvent le rôle malheureusement déterminant de l'erreur humaine dans les enchaînements de causes générateurs d'accidents. Dans les métros entièrement automatisés, les automatismes assurent seuls la sécurité d'exploitation quand le système fonctionne en mode nominal, c'est-à-dire plus de 98 % du temps en moyenne. Dans ce fonctionnement nominal, rappelons que les opérateurs ne surveillent pas les automatismes, contrairement à une opinion couramment répandue dans le public. Le nombre d'informations et d'ordres élémentaires que traitent à chaque seconde les automatismes de conduite et de sécurité est tel que tout contrôle humain est par nature exclu. L'intérêt des automatismes réside dans leur vitesse et l'exactitude de leurs réactions, toutes deux supérieures à celles de l'homme.

Par contre, à tout signal d'anomalie les opérateurs sont alertés. Selon la nature de l'incident ils peuvent alors, pour assurer la disponibilité, devoir prendre en main le contrôle du système en y assurant eux-mêmes des fonctions sécuritaires. La sécurité des métros traditionnels est très bonne comme vous le savez tous à l'UITP et comme le rappellera la communication du Professeur Gabillard. Cependant, on peut considérer que la sécurité sera renforcée proportionnellement à l'extension du domaine couvert par les automatismes et à l'accroissement de la durée pendant laquelle l'exploitation est totalement sous le contrôle des automatismes. L'absence de tout acci-

dent d'exploitation en service commercial à Lille après plus de 15 millions de trains-km parcourus à près de 34 km/h de vitesse commerciale et plus de 150 millions de voyageurs correspond à un taux d'accidents inférieur à  $7 \cdot 10^{-8}$  train-kilomètre. Ce chiffre commence à être significatif, bien que mathématiquement limité par le nombre de kilomètres parcourus depuis la mise en service.

La contrepartie du renforcement de la sécurité qu'apporte l'automatisme intégral est la confiance excessive que les opérateurs ont tendance à accorder au système. L'accident récent survenu lors d'un vol de démonstration d'un Airbus à Mulhouse en est une illustration particulièrement significative. Il est nécessaire de mettre en œuvre d'importants programmes de motivation et de formation des opérateurs pour entretenir de manière permanente leur vigilance et leur conscience permanente de la priorité absolue qui doit être donnée en toute circonstance et sans aucune exception, aux consignes de sécurité.

### 3.2 La souplesse d'exploitation

Les fêtes de la braderie annuelle de Lille pendant lesquelles le métro fonctionne pour satisfaire la demande sans arrêt pendant 44 heures dont 15 consécutives à la cadence des heures de pointe, la Foire Internationale de Vancouver pendant laquelle la clientèle transportée a atteint certains jours 3 à 4 fois la clientèle journalière en exploitation normale, mettent en évidence la formidable souplesse d'adaptation des systèmes où la circulation des trains est indépendante des tours de service du personnel. Cet avantage avait certes été escompté notamment pour le maintien dans des conditions économiques d'une bonne cadence de service en soirée, et le maintien en réserve de trains prêts à relever ceux qui quittent la ligne en cas de panne. Les facilités d'organisation qu'il procure tout au long de la journée avaient cependant été sous-estimées lors des premières études.

La coordination des mouvements des trains avec les services du personnel est tellement ancrée dans nos habitudes qu'il a fallu expérimenter l'organisation de la circulation des trains en fonction des seuls besoins de la clientèle, sans les contraintes des prises et des fins de service dont nous connaissons tous le poids, pour en percevoir et en exploiter toutes les possibilités. Il est maintenant de pratique courante à Lille par exemple d'améliorer les fréquences de manière très fine en fonction du trafic tout en maintenant constant le nombre total de kilomètres parcouru par les trains afin de garder un coût d'exploitation constant. Ces optimisations de l'offre en fonction de la demande sont impossibles quand il y a du personnel embarqué dont il faut respecter les plages horaires de travail.

### 3.3 La qualité de service

La sécurité et la souplesse d'exploitation sont des facteurs importants de la qualité de service des métros totalement automatisés. Il s'y ajoute les possibilités de communication avec les opérateurs du poste central qui ont déjà été évoquées, et la disponibilité aux voyageurs des agents présents en ligne. Ce personnel est peu nombreux, mais sa mission principale est l'accueil du public. Il s'y ajoute aussi le maintien tout



Fig. 2 :  
Le poste central  
de commande  
du VAL à Lille.

au long de la journée de fréquences de passage élevées, dans l'absolu comme en comparaison avec les autres transports. C'est ainsi qu'à Lille l'intervalle maximum entre trains, même tôt le matin et pendant la soirée, est de 6 minutes. Ainsi, même aux heures les plus creuses, les clients trouvent 10 trains par heure et par sens.

Les autobus qui assuraient jadis cette desserte à raison de 2 autobus à l'heure le soir étaient souvent complètement vides alors que maintenant une rame de métro n'est jamais vide le soir. Quand le métro est conçu dès l'origine comme totalement automatique, il offre, pour une capacité donnée, des passages plus fréquents de rames plus légères. Ainsi les économies d'infrastructure s'accompagnent d'une réduction de l'attente des clients, à laquelle ils se montrent très sensibles. Pour les clients d'un métro automatique, l'adaptation fine en temps réel de l'offre à la demande et le maintien de fréquences élevées, se traduisent par le sentiment d'une grande disponibilité du métro. Quand il y a affluence, les trains se présentent à grande fréquence. C'est ainsi qu'à Lille peu de voyageurs courent pour monter dans le train, ils savent d'expérience que le train suivant arrive tout de suite. L'angoisse du voyageur inquiet de manquer son train n'existe pas dans un métro automatique à intervalle court. C'est un progrès considérable. Le gain de clientèle et de recettes qui en résulte est certain, même s'il est difficilement quantifiable.

Le public se montre très réceptif à toutes ces améliorations de la qualité de service et de l'accueil. Il n'est malheureusement pas possible de mesurer par de simples comptages l'écart de la clientèle entre une ligne de métro totalement automatique existante et une ligne traditionnelle qui lui serait substituée, mais il apparaît raisonnable d'admettre que les sentiments très positifs de la clientèle des lignes totalement automatisées, tels qu'ils ressortent des enquêtes, s'accompagne d'une fréquentation supérieure à celle d'une ligne traditionnelle. J'estime personnellement, en étant très prudent, que cette augmentation de clientèle est de l'ordre de 20 %.

Il sera donc normal dans les bilans économiques de l'automatisation intégrale de prévoir une clientèle et donc des recettes supérieures à celles d'un métro traditionnel équivalent, tout en sachant qu'il n'existe pas de méthodes précises pour quantifier cette clientèle supplémentaire.



Fig. 3 : Informations et commandes disponibles au poste central de commande du VAL à Lille.

### 3.4 L'enrichissement des tâches du personnel

Exploiter un métro totalement automatique, c'est gérer les interfaces multiples entre le système automatisé, les voyageurs, les opérateurs et tout leur environnement urbain.

C'est-à-dire qu'il faut concevoir et appliquer un ensemble de consignes qui garantissent dans toutes les situations possibles la sécurité et le niveau de performance de l'exploitation. Les opérateurs du poste central sont les maîtres d'un système dont ils analysent et interprètent les paramètres, aussi bien pour la conduite des opérations que pour les pré-diagnostic de maintenance. Les opérateurs de la ligne 1 de Lille disposent par exemple à Lille de 8 000 informations, accessibles en temps réel, et peuvent agir sur 2 000 télécommandes. En outre ils dialoguent régulièrement avec le public dont ils sont les correspondants privilégiés, avec en permanence une vue complète sur l'ensemble de la ligne. Les agents en ligne remplissent pour leur part des missions d'accueil et de contrôle de la clientèle et des tâches de maintenance technique simple.

Ainsi se créent de nouvelles fonctions, plus techniques, plus riches et donc plus motivantes que celles d'un conducteur ou d'un chef de train ou d'un agent de vente de titres en station. Ainsi grâce à la puissance des outils que l'automatisme intégral met à la disposition des équipes de l'exploitant, de nouveaux métiers apparaissent.

### 4 Perspectives

L'histoire des transports urbains, avec ses hauts et ses bas, peut s'interpréter comme l'histoire des décalages et des harmonies entre la technologie et l'ambiance des réseaux de transport d'une part et celles de l'urbanisme desservi d'autre part. La grande crise des transports publics à la fin des années 60 correspond à une période de décalage maximum entre des autobus et des métros vieillissants, insuffisamment entretenus et renouvelés, et le développement de zones résidentielles modernes en périphérie des villes accompagné de la modernisation des bureaux et des zones commerciales des centres ville. La croissance rapide d'un parc d'automobiles de plus en plus confortables accentuait encore ce décalage qui a donné aux transports collectifs une image miséabilisante dont ils souffrent encore.

Les autobus, les tramways et les métros sont sortis de la crise en se modernisant, en offrant à nouveau à leur clientèle un confort et une qualité de service en harmonie avec leur environnement urbain.

Dans cette démarche, l'automatisation intégrale de nouvelles lignes de métro constitue une avancée significative pour l'image de marque des transports collectifs, à l'heure des immeubles de bureau entièrement câblés, de l'informatique domestique et des automobiles qui parlent.

Les rapports qui vont suivre illustreront les tendances de ce mouvement, avec la présentation par notre collègue Lombart des travaux réalisés au sein du Comité pour étudier les méthodologies d'automatisation par étapes successives des lignes existantes jusqu'au stade ultime de l'automatisation intégrale et la présentation par notre collègue Döpfer des nouveaux projets d'automatisation en cours de développement en Allemagne.



Le Professeur Robert Gabillard, expert international en sécurité et en automatisation des systèmes de transport, nous parlera des rôles respectifs des automatismes et des facteurs humains dans la genèse des accidents, ce qui contribuera à caractériser l'apport décisif que l'automatisation intégrale apporte à la sécurité de l'exploitation.

Les perspectives de l'automatisation intégrale sont différentes selon le domaine considéré.

Les créations de lignes nouvelles totalement automatisées se généralisent et déjà, dans de nombreux pays, l'on ne construit plus de nouvelles lignes sans en envisager l'automatisation intégrale.

L'automatisation intégrale de lignes existantes, pour séduisante qu'elle apparaisse en termes de souplesse d'exploitation, de qualité de service et d'économies, pose des problèmes complexes. Techniquement, l'automatisation intégrale n'est pas simplement

une nouvelle étape dans une évolution continue des automatismes, c'est une transformation très importante dans la structure même des systèmes et notamment dans la conception des interfaces entre les agents d'exploitation et le système de transport dont la réalisation peut demander des interruptions de service difficiles à organiser. Economiquement, les investissements de transformation d'un système peuvent être importants et difficiles à rentabiliser. Humainement et socialement, l'évolution des effectifs et des qualifications du personnel demande une importante préparation. Mais les avantages qu'apporte l'automatisation intégrale à la clientèle sont tels que je suis certain que les efforts de réflexion et d'étude déjà largement engagés se poursuivront pour élaborer et développer les méthodes et les techniques qui permettront aux lignes existantes d'accéder plus ou moins progressivement au nouveau monde de l'automatisation intégrale de l'exploitation.

## Deuxième partie : Méthodologie dans l'approche de l'automatisation dans les réseaux existants

### SYNTHESE DES TRAVAUX EFFECTUES PAR LE GROUPE DE TRAVAIL AUTOMATISATION DU SOUS-COMITE EXPLOITATION DU COMITE INTERNATIONAL DES METROS (CIM)

PAR

Antoine LOMBART,

Directeur de l'Exploitation, Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles (STIB),  
Bruxelles (Belgique),

Président du Sous-Comité Exploitation du CIM

#### 1 Introduction

Dès la première session du Sous-Comité Exploitation tenue à Hambourg les 4 et 5 mai 1983, la décision suivante a été prise :

« Le Sous-Comité nouvellement fondé a pour mission de se consacrer à toutes les questions relevant du domaine de l'exploitation, et ce, aussi bien dans le cas de l'exploitation conventionnelle que dans celui de l'automatisation intégrale (comme à Lille par exemple). Ceci découle notamment du fait que les métros conventionnels peuvent faire l'objet d'une automatisation progressive et que les problèmes posés par une exploitation partiellement ou totalement automatisée doivent être résolus par ces réseaux. La collaboration de Lille aux travaux du Sous-Comité revêt donc une importance particulière puisqu'elle permettra de disposer directement d'informations concernant les expériences faites pendant l'exploitation du premier métro intégralement automatique.

Les thèmes et documents de travail qui n'ont pu être traités par le groupe de travail « Automatisation intégrale de l'exploitation » seront repris dans le programme de travail du Sous-Comité « Exploitation ».

Les membres du Sous-Comité ont régulièrement au cours des sessions suivantes pris connaissance :

- des résultats très encourageants enregistrés sur le réseau de Lille;
- des diverses phases de l'étude et essais effectués sur les réseaux de Hambourg (projet Push) et Berlin (projet Seltrac);
- des divers aspects de la préparation de la ligne D du réseau de Lyon qui sera complètement automatisé dès sa mise en service.

Les réseaux suivants participent aux travaux du Sous-Comité :

- comme membres : Amsterdam, Berlin, Bruxelles, Hambourg, Lille, Londres, Lyon, Madrid, Mexico, Milan, Munich, Paris, Prague et Rio de Janeiro;
- comme observateurs : Helsinki, Marseille, Stockholm, Vienne.

Y sont donc représentés :

- des réseaux de grande taille;
- des réseaux de moyenne et petite taille;
- des réseaux comptant de nombreuses décennies d'existence;
- des réseaux d'environ dix ans d'existence et moins;
- des réseaux à technologie ancienne et récente;
- un réseau entièrement automatique.

Le Sous-Comité, présidé successivement par le professeur Hans Meyer, Vorstandsmitglied der Hamburger Hochbahn Aktiengesellschaft, et présentement président du CIM, par Paul Appelmans, Administrateur-directeur général de la Société des Transports Intercommunaux de Bruxelles et présentement Conseiller du président du Conseil d'administration et par l'auteur de cette partie du rapport, s'est réuni à ce jour à 11 reprises.

L'automatisation de l'exploitation de métros a fait l'objet de communications et de discussions lors de huit sessions.

Dès la septième session tenue à Amsterdam les 17 et 18 avril 1986, le Sous-Comité décida la création d'un groupe de travail sous la présidence du réseau de Berlin et comprenant en plus les réseaux de Hambourg et Lyon avec l'appui du réseau de Lille.

#### 2 Considérations générales

Dès le début de la décennie, de nombreux réseaux métropolitains ont commencé à réfléchir à l'automatisation intégrale de l'exploitation pour déterminer si c'était à terme une réponse aux problèmes de la profession et aux attentes de la clientèle. D'ailleurs ces réseaux, sous l'impulsion du Comité international des métros (CIM) ont décidé de mettre en commun leurs réflexions : un groupe de travail a été créé à cet effet sous l'égide du CIM; il a déposé ses conclusions en 1983 sous forme d'un rapport qui a été présenté au Congrès international de l'UITP, à Rio de Janeiro. Ce Groupe de travail a donc œuvré avant la constitution des Sous-Comités au sein du CIM.

Il est apparu clairement au cours de ces travaux que si l'automatisation n'était pas une fin en soi, elle constituait un moyen privilégié pour conduire à :

- une amélioration de la qualité de service et de la souplesse d'exploitation;
- une amélioration du niveau général de sécurité;
- une augmentation de la capacité de transport alors que le parc de véhicules reste inchangé;
- une amélioration des conditions de travail du personnel;
- une réduction substantielle des coûts opérationnels;
- une amélioration de la maintenance, au sens de l'efficacité, ceci se traduisant par une disponibilité plus grande des matériels et équipements, laquelle conduit à la réduction des coûts de fonctionnement et à l'amélioration de la qualité de service.

L'automatisation intégrale d'un métropolitain peut s'analyser suivant trois approches différentes:

#### 1) L'automatisation intégrale d'un métropolitain nouveau

Le choix est fait dès l'origine de l'étude. C'est le cas du Val à Lille qui a été brillamment exposé par notre collègue M. Frey, Président de la Compagnie du Métro de Lille (Comeli), que je tiens à féliciter chaleureusement pour la brillante réussite du réseau de Lille. Je n'évoquerai donc pas ce cas.

#### 2) L'automatisation intégrale d'un métropolitain en cours de construction

La construction de l'infrastructure génie civil des tunnels et stations est déjà partiellement réalisée. Le choix de l'automatisation se fait ensuite. C'est le cas du réseau de Lyon dont il sera largement fait écho dans ce rapport.

#### 3) L'automatisation intégrale d'un métropolitain existant

Une étude détaillée a été effectuée par les réseaux de Hambourg et de Berlin; ces deux approches seront analysées dans le présent rapport.

Je remercie mes collègues MM. Teillon, de Lyon, Burmeister, de Hambourg et Kratky, de Berlin pour leur importante participation dans la rédaction du présent rapport.

### 3 Analyse de l'approche faite par le métro de Lyon quant à l'exploitation de la future ligne «D»

#### 3.1 Description sommaire des particularités de la ligne D

La ligne D est conçue pour être exploitée sans conducteur avec des rames de deux voitures pouvant être accouplées pour constituer des rames de quatre voitures.

Toutes les fonctions depuis le réveil des trains, leur dégarage jusqu'au garage et la mise en état de veille à la fin du service ont été automatisées.

Les stations ne sont pas équipées de portes palières, plusieurs dispositifs seront mis en place pour

assurer la protection des voyageurs lors de l'échange en station:

- système à infrarouge pour la détection des chutes sur la voie;
- bords sensibles sur les portes pour l'entraînement au démarrage;
- fermeture des extrémités de station pour les intrusions en tunnel.

#### 3.2 Comparaison des coûts entre une solution automatisation intégrale et une solution identique aux lignes existantes

Cette comparaison a été réalisée lors de l'instruction de la décision par les autorités locales.

— La comparaison a porté sur:

- les coûts d'investissement,
- les coûts d'exploitation,
- les autres facteurs tels que la qualité de service.

— La conception des stations étant déjà bien engagée au moment du choix, la comparaison n'a été faite que sur les équipements modifiés par l'automatisation soit:

- le matériel roulant.
- le pilotage automatique,
- les commandes centralisées,
- la signalisation,
- les équipements spécifiques de sécurité quai-voie.

##### 3.2.1 Coût d'investissement

Le graphique ci-après montre les écarts entre les deux solutions. Il est à préciser qu'il est difficile d'identifier les écarts dus à l'automatisation de ceux dus aux rames à composition variable.

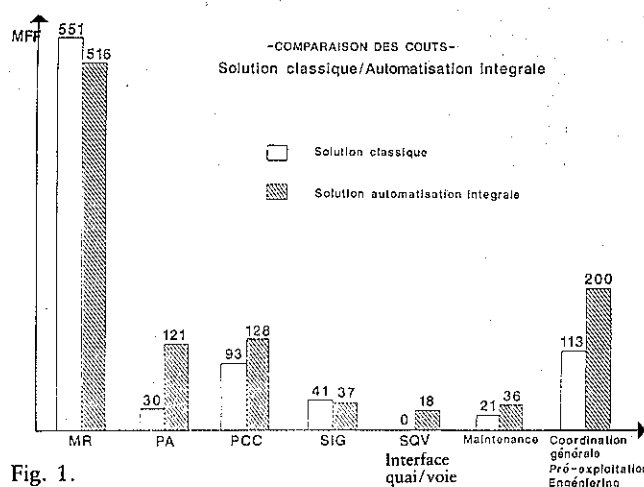


Fig. 1.

Pour le matériel roulant l'écart résulte:

- d'une diminution du coût induite par:
  - la réduction du parc en raison:

- du temps gagné sur la durée du tour par suppression du temps de changement de cabine par le conducteur et par gain sur les temps de pause aux terminus (gain de deux trains);
- de la réduction du nombre de km effectués (trains de deux voitures en heures creuses) et l'amélioration du diagnostic de pannes conduisant à une réduction du taux de réserve de 15 % à 10 % (gain d'un train);

— la suppression des cabines de conduite et leur remplacement par un minipupitre;

- d'une augmentation des coûts due à la réalisation et à l'automatisation de nouvelles fonctions:

- préparation et dépréparation,
- accouplement et désaccouplement;
- détection d'entraînement;
- doublement de certaines fonctions jugées vitales pour la disponibilité du système.

#### *Pour le pilotage automatique*

Le surcoût est dû à l'automatisation de toutes les fonctions assurées par le conducteur:

- en monde nominal
  - préparation, dépréparation;
  - garage, dégarage;
  - retournement automatique en terminus.
- en mode dégradé
  - secours automatique d'une rame avariée.

#### *Pour les commandes centralisées*

Le surcoût est essentiellement lié à la centralisation d'un plus grand nombre de commandes et contrôles pour les besoins de l'automatisation et à une fonctionnalité améliorée pour l'aide aux régulateurs.

#### *Pour la signalisation*

La réduction du coût est due à:

- la réalisation d'un certain nombre de fonctions habituellement réalisées par la signalisation et assurées dans le cadre de la ligne D par le pilotage automatique;
- la suppression de certains modes dégradés de commande locale, l'automatisation intégrale étant conçue pour une meilleure disponibilité (suppression des pupitres des postes de manœuvres locaux).

#### *Pour le système de détection de chute sur la voie*

Ceci comprend le système de détection et les interfaces avec le pilotage automatique et les commandes centralisées.

Le bilan comparatif global s'établit ainsi en MFFr hors taxes (base janvier 1985) selon le tableau ci-après, soit avec un écart d'environ 200 MFFr (base janvier 1985).

Il faut préciser, notamment au niveau du pilotage automatique, de la coordination générale et du système de chute sur la voie, que les coûts ci-dessous intègrent des coûts de développement.

	Solution niveau 2 Automatisation intégrale	Solution niveau 1 Pilotage automatique avec conducteur
Matériel roulant . . .	516 MFFr	551 MFFr
Pilotage automatique .	121 MFFr	30 MFFr
Poste de commande central. . . . .	128 MFFr	93 MFFr
Signalisation . . . . .	37 MFFr	41 MFFr
Détection chute sur la voie . . . . .	18 MFFr	0 MFFr
Maintenance . . . . .	36 MFFr	21 MFFr
Coordination, ingé- rie préexploitation . .	200 MFFr	113 MFFr
	1 056 MFFr	849 MFFr

### 3.2.2 Coût d'exploitation

Le bilan a été fait sur:

- les coûts de personnel;
- les coûts de maintenance;
- les coûts d'énergie.

#### 3.2.2.1 Les coûts de personnel

Le gain apporté par la suppression des conducteurs n'a pas été entièrement économisé car l'opportunité a été saisie pour mettre plus de personnel dans les stations que sur les lignes existantes pour répondre à une demande de la clientèle. Dans ces conditions le gain global est de 9 MFFr/an.

Par ailleurs un gain de 2 MFFr/an est dû à la réorganisation des commandes centralisées.

#### 3.2.2.2 Les coûts de maintenance

On peut distinguer deux parties:

*Ce qui est du fait de l'automatisation* qui entraîne un surcoût de:

- + 0,5 MFFr pour le matériel roulant,
- + 1,7 MFFr pour les installations fixes,

compte tenu d'un nombre plus important d'équipements électroniques et d'une plus grande technicité du personnel.

*Ce qui est du fait de l'exploitation* à composition variable qui entraîne une économie de 1,1 MFFr compte tenu de la réduction du nombre de voitures/km.

#### 3.2.2.3 Les coûts d'énergie

Ils sont induits comme ci-avant par l'exploitation des rames à composition variable et la réduction du nombre de voitures/km.

Le gain pour la ligne D est de 1,8 MFFr/an.

#### 3.2.2.4 Bilan global

Le gain annuel global est donc de 11,7 MFFr/an.

### 3.2.3 Conclusion

Le financement du surcoût d'investissement de 200 MFFr est donc figuré par:

- le gain de coût d'exploitation permettant de financer environ 110 MFFr d'investissement;

- une aide de l'Etat et de la RATP de 40 MFFr devant être considérée comme financement des dépenses de recherche et de développement;
- le solde étant pris en charge par la collectivité compte tenu de l'amélioration du service offert à la clientèle.

On peut donc constater que l'équilibre financier n'étant pas assuré, d'autres raisons ont influé le choix final.

### 3.3 Autres facteurs de décision

#### 3.3.1 La qualité de service

Il est espéré un accroissement supplémentaire de la clientèle dépendant de l'amélioration de la qualité de service apportée par l'automatisation intégrale.

Sur les lignes existantes 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 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.

#### 3.3.2 La valorisation des métiers

Reste l'aspect social et sociologique; il faut constater d'abord que le métier de conducteur dans un métro à haut niveau d'automatisation 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 a généralisé 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 de supprimer certaines catégories de personnel que de faire évoluer des métiers en leur trouvant une nouvelle valorisation.

Dans le cas de Lyon, 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 de 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.

## 4 Projet PUSH de Hambourg

### Effets financiers de l'automatisation d'une ligne de métro — Cas de Hambourg

#### 4.1 Situation de départ et objectifs

1) Le réseau de métro existant à Hambourg a atteint un niveau élevé dans le domaine de l'exploitation, la sécurité, la fiabilité et l'économie.

L'économie est principalement influencée par le poste «coûts de personnel».

En ce qui concerne le personnel, le réseau de métro de Hambourg est caractérisé par le fait que chaque train est équipé d'un conducteur, et en général chaque station d'un agent. Le personnel des stations a comme tâche essentielle d'assurer le départ des trains, l'information des voyageurs et la surveillance des installations et équipements dans les stations.

La gestion des itinéraires des trains s'effectue au moyen d'un nombre de postes répartis sur le réseau d'une manière décentralisée.

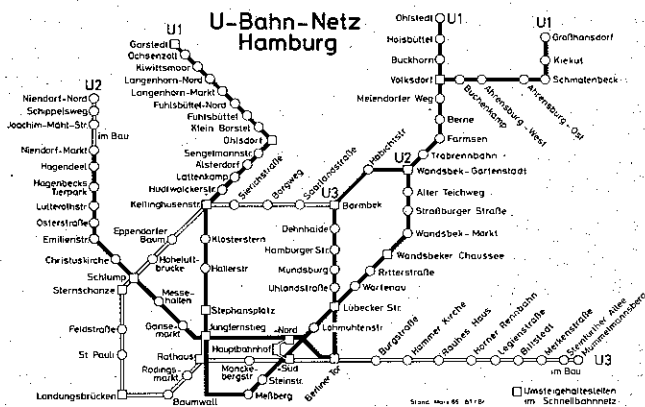


Fig. 2: Plan du réseau de métro à Hambourg.

2) Afin de pouvoir maintenir, voire augmenter à long terme, l'attractivité d'une exploitation économique du point de vue de l'exploitant, il faut envisager la centralisation de fonctions restées jusqu'à présent décentralisées et manuelles, ainsi que l'application de mesures visant à diminuer les frais d'exploitation par l'introduction de nouvelles techniques d'exploitation.

3) A cette fin, avec le support du Ministre fédéral de la Recherche et de la Technologie, il a été développé et testé un projet de système qui ne nécessiterait plus de personnel permanent aux arrêts ni dans les trains, en concentrant le personnel aux points importants du réseau de métro (postes centraux en ligne).

#### 4.2 Description du projet d'automatisation

4) Le projet de système (Système d'automatisation de métro par processeur = PUSH) s'incorpore dans deux systèmes partiels concordants et reliés :

- automatisation de l'exploitation par commande par ordinateur des postes centraux et des installations des stations (sous-système automatisation des lignes);
- automatisation de l'exploitation par action sur les trains en ligne commandée par ordinateur (sous-système automatisation de la conduite).

5) L'automatisation des voies comprend les domaines suivants :

- traitement des numéros des trains avec le terminus de destination et indication de terminus des trains au moyen des numéros des trains et commande des annonceurs de destination des trains dans les stations;
- traitement des horaires avec comparaison des positions théoriques et réelles ainsi que l'indication des écarts à l'horaire théorique;
- tracé automatique des itinéraires avec la demande automatique des itinéraires au poste central par l'ordinateur sur base de l'horaire et de la position actuelle des trains;
- départ commandé par poste central à l'aide d'écrans de TV avec reprise de l'image suivant

horaire au poste central, information automatique des voyageurs en station ainsi que l'information des dispatchers quant aux écarts à l'horaire des trains;

- contrôle et surveillance des stations avec contrôle automatique par ordinateur de tous les équipements techniques des stations et la surveillance visuelle sur écran TV des quais et des mezzanines.

Les éléments s'accordent et fonctionnent ensemble sans problème. En cas d'irrégularité et d'anomalie, l'intervention sur site de personnel ambulant est prévue.

6) L'automatisation de l'exploitation par action sur les trains en ligne commandée par ordinateur :

- la commande des trains dépendant de l'état des horaires avec marche et freinage automatiques;
- distance de sécurité entre trains garantie.

7) La transmission d'information à partir et vers les trains se fait cycliquement par circuits de ligne d'une longueur d'environ 3 km et avec une distance entre balises de 25 m. La voiture vérifie sa vitesse en permanence en respectant les limites prévues et calcule elle-même les freinages nécessaires aux points dangereux. La voiture signale la situation d'exploitation de chaque installation ainsi que les défauts des équipements qui sont importants pour l'exploitation.

8) Afin d'obtenir un niveau de sécurité et de fiabilité élevé, le système automatisé est structuré hiérarchiquement dans son fonctionnement technique et son organisation d'exploitation. L'ensemble du

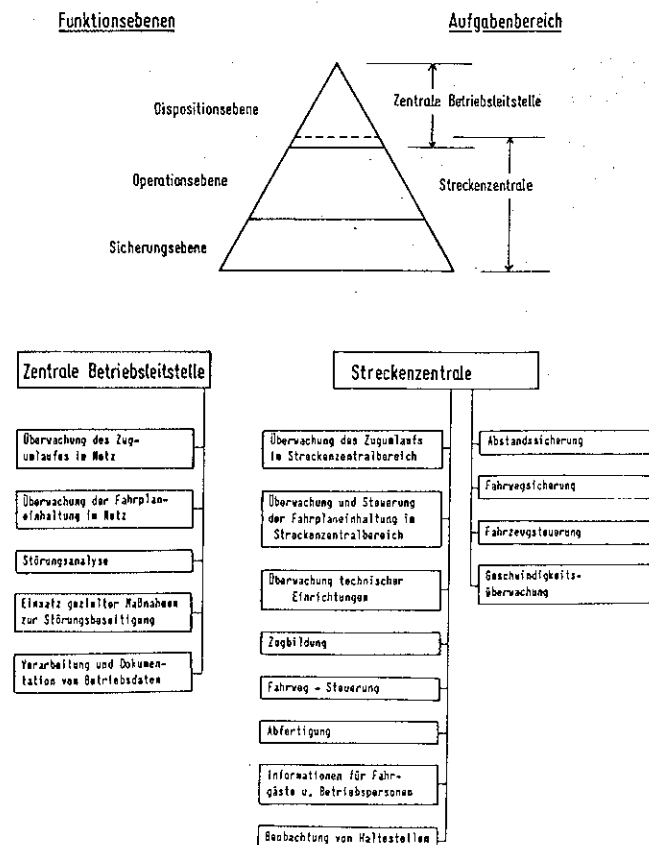


Fig. 3: Schéma du système d'automatisation de Hambourg.

système comprend trois niveaux de fonctionnement (voir figure 3 ci-avant):

- niveau de disposition (ATS) avec le contrôle et la gestion de l'exploitation, le traitement de données d'exploitation et l'introduction de stratégies en cas de défaut;
  - niveau d'exploitation (ATO) avec la commande d'itinéraire, la composition des trains et la régulation de l'exploitation sur base des horaires.
- De plus, ce niveau comprend le départ commandé par ordinateur des trains ainsi que la surveillance commandée par ordinateur et visuelle des stations et l'information des voyageurs;
- niveau de sécurité (ATC) avec la sécurité des itinéraires et des distances, contrôle de vitesse et la gestion et surveillance élémentaires des fonctions des voitures.

9) La construction hiérarchique de l'ensemble du système a comme avantage qu'en général, lors d'anomalies à un niveau supérieur, l'exploitation peut être maintenue en toute sécurité à un niveau automatisé inférieur.

10) Les équipements techniques de gestion et de fonctionnement de l'exploitation sont parfois concentrés dans des postes centraux pour des tronçons longs de 6 km environ. L'emplacement correspond au rayon d'action des équipements techniques les plus importants, comme aiguillage et action sur train en ligne, permettant d'éviter dans une grande mesure l'acquisition d'installations chères et coûteuses. Selon

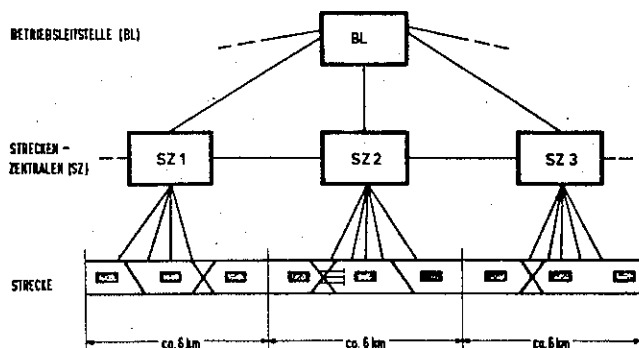


Fig. 4: Poste de contrôle central, postes en lignes et tronçons d'exploitation à Hambourg.

les prévisions actuelles, le réseau de métro de Hambourg comprendra 11 postes centraux. Les postes centraux sont reliés entre eux ainsi qu'au poste de contrôle central par des lignes de données.

11) La répartition des tâches dans le système est réglée de façon à ce que le poste de contrôle central reprenne les tâches dispositives supérieures (ATS), tandis que les postes centraux en ligne sont responsables de la sécurité, la surveillance et le fonctionnement de l'exploitation (ATO et ATC) dans le tronçon attribué.

Si la notion ATO est prise au sens large du mot, le niveau de l'exploitation comprend non seulement la surveillance et le fonctionnement de l'exploitation des trains proprement dits, mais également la surveillance et la gestion automatisée des arrêts.

#### 4.3 Résultat de l'analyse utilité/coûts

12) Dans le cadre de l'examen et des intentions de développement du système PUSH, la rentabilité de l'automatisation du métro devait être examinée. Dans l'analyse utilité/coûts une comparaison entre l'exploitation conventionnelle actuelle métro et l'automatisation future de l'exploitation métro sur le plan de la circulation sur le réseau et sur celui des effets économiques est à établir.

13) Par l'évaluation du projet d'automatisation dans le cadre du « modèle utilité » il sera démontré dans quelle mesure l'exploitation PUSH contribuera à atteindre les objectifs fixés par l'entreprise HHA. Objectif globaux de la HHA:

1. amélioration du service offert à la clientèle;
2. accroissement de la productivité;
3. sécurité garantie;
4. respect des conditions générales socio-politiques;
5. accroissement de la rentabilité.

Tandis que l'objectif 5 est traité dans le « modèle coûts », les objectifs 1-4 sont examinés dans le « modèle utilité ».

14) Dans cette étude la méthode d'évaluation du « modèle utilité » ne sera pas approfondie. Par contre, le résultat de l'évaluation peut être résumé et les objectifs fixés par l'entreprise peuvent plus facilement être atteints par des phases d'automatisation consécutives que par les moyens techniques actuels.

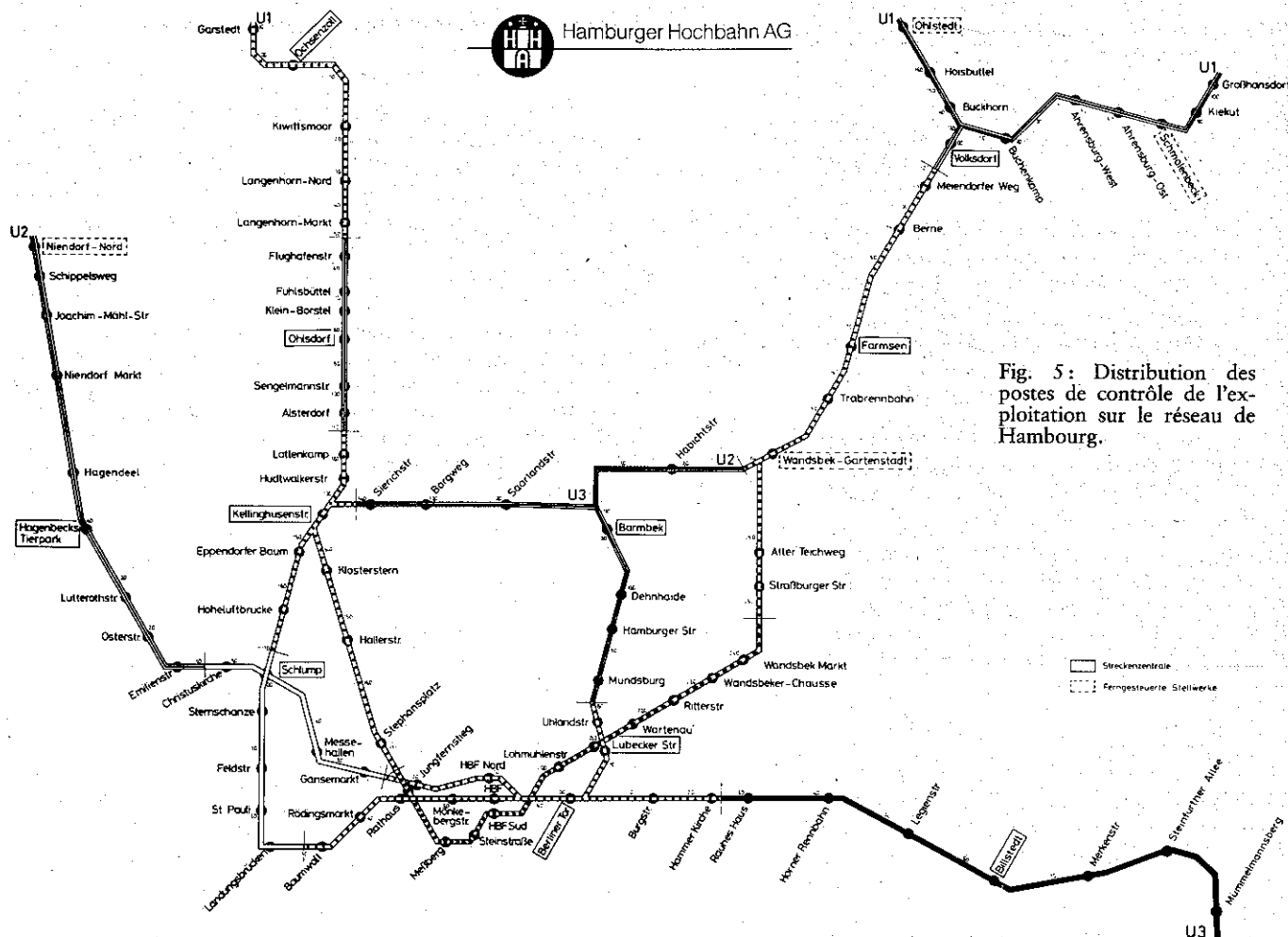
15) Le système PUSH prévoit l'exploitation entièrement automatisée du métro sans personnel de conduite. Sur base de la construction du système modulaire l'entreprise peut cependant envisager l'application de solutions partielles. Cela implique pour l'évaluation que dans l'étude il faudra non seulement tenir compte de l'exploitation entièrement automatisée du PUSH, mais également de phases d'exploitation intermédiaires pouvant être exécutées techniquement. Par conséquent toute alternative d'évaluation doit pouvoir être examinée.

16) Le point de départ pour les évaluations dans le « modèle coûts » est le niveau des moyens techniques, caractérisé par (alternative 1):

- arrêts équipés (présence de personnel);
- dispositifs de postes d'aiguillages centralisés;
- postes de commandement informatisés;
- contrôle et commande centralisés des installations d'alimentation en énergie électrique (station de commande centrale).

L'alternative 2 propose l'automatisation des itinéraires. Dans ce cas les postes d'aiguillages centraux sont commandés par calculateur et la surveillance des arrêts, de même que les préparatifs en vue des départs des trains sont transférés à ces postes d'aiguillages.

A partir des équipements techniques nécessaires pour l'automatisation des itinéraires, la conduite des trains est automatisée dans l'alternative 3. En outre, la conduite des trains, la confection des horaires et



L'arrêt automatique des trains sont transférés au « LZB ». L'agent de train est déchargé de la conduite de celui-ci et du respect des horaires, il doit toutefois continuer à surveiller les voies.

L'objectif final du PUSH, c'est-à-dire l'alternative 4, est atteint par l'introduction de la conduite automatique sans conducteur. Elle correspond, quant à l'équipement technique et le mode d'exploitation, pratiquement à l'alternative 3. L'appel de secours moyennant l'utilisation d'un système téléphonique sélectif, ainsi que des dispositifs techniques de sécurité le long des itinéraires et aux arrêts, sont également nécessaires.

17) Pour chaque alternative d'appréciation, les modifications et l'automatisation conditionnée ont été examinées sur le plan :

- des investissements;
- des coûts de maintenance;
- du coût du personnel;
- du coût de l'énergie.

L'addition des résultats démontre que l'automatisation intégrale de l'exploitation du métro donne une nette amélioration des résultats.

L'automatisation des itinéraires comme dernière phase de réalisation fait que les coûts relatifs à l'automatisation sont pratiquement compensés par les effets de rationalisation de celle-ci et que le résultat de l'entreprise reste quasiment inchangé (avec subside GVFG).

Les mesures résultant de l'automatisation des itinéraires conduisent à des charges supplémentaires aussi longtemps qu'il y a du personnel de conduite à bord.

L'efficacité, du point de vue de l'entreprise, de toute alternative d'automatisation est conditionnée par l'apport de subvention.

18) En ce qui concerne la rentabilité, il est à signaler que :

Le concept PUSH a des conséquences sur l'effectif du personnel. Des tâches accomplies jusqu'à présent par du personnel disparaissent ou diminuent. D'autre part, des tâches nouvelles intégrées au système s'ajoutent. La diminution des frais de personnel dans le domaine du personnel d'exploitation ressort clairement. La diminution des frais de personnel quant à la maintenance est comprise dans les frais de maintenance. Des modifications liées à l'automatisation se produisent au niveau des fonctions suivantes : aiguilleur, surveillant de quais, garde, signaleur et conducteur.

Nouvelles fonctions : pointeur, agent chargé de la surveillance aux arrêts et service mobile.

#### 4.4 Conclusions

19) Sur base de l'essai effectué en décembre 1984 et des résultats de la présente étude, ainsi que des



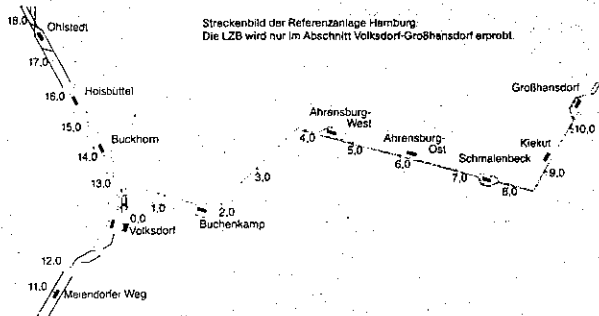


Fig. 6: Schéma de l'installation d'essai du métro de Hambourg.

conditions techniques actuelles du réseau de métro, la HHA a formulé les conclusions suivantes :

- 1) l'automatisation de la conduite cesse d'être développée, étant donné qu'elle nécessite des frais d'investissement et d'exploitation élevés et qu'elle n'est pas réalisable à court terme.

La possibilité d'une automatisation future de l'exploitation en utilisant la technologie industrielle existante sera tenue en suspens. Des développements techniques de l'industrie en cette matière se poursuivront;

- 2) l'automatisation de l'itinéraire introduite sur la ligne d'essai dans le cadre du projet PUSH sans personnel fixe aux arrêts, est maintenue;
- 3) pour l'exploitation future du Hamburger U-Bahn, un nouveau concept est développé sur base de composantes adéquates en matière d'automatisation d'itinéraires. Il sera pris comme hypothèse que les trains seront occupés par un conducteur qui, à l'avenir, s'occupera également de la préparation du train, et que la plupart des arrêts seront dépourvus de personnel fixe.

De ce mode d'exploitation, il est attendu une nouvelle diminution des frais de personnel de quelque 2,5 millions de DM/an pour la ligne U2.

## 5 Projet Seltrac de Berlin

Ce projet est commenté par notre collègue, M. H. Döpfer, Mitglied der Geschäftsleitung, de BVG Berlin. Je me contenterai donc d'en évoquer les points principaux.

Le projet Seltrac subventionné par le Ministère de la recherche et de la technologie de la RFA avait comme objectifs :

- centraliser toutes les informations destinées aux voyageurs;
- réaliser la guidance à distance;
- contrôler de manière centralisée tout ce qui concerne les installations électriques;
- économiser du personnel.

Il fallait donc démontrer la faisabilité de l'automatisation complète sans personnel.

Les essais ont débuté en 1981 sur la ligne 4, longue de 3 km, où l'intervalle entre trains est de 5 minutes. Des essais ont également été réalisés à des

fréquences inférieures à 2 minutes, mais sans voyageurs. L'expérience s'est révélée positive tant du point de vue technique qu'économique.

Pour tester les performances techniques, on a réalisé des essais de circulation des trains sans horaires. L'intervalle moyen entre trains était de 96 secondes, l'intervalle minimum absolu de 41 secondes.

Du point de vue financier, des rapports réalisés par deux firmes montrent qu'il y a compensation des dépenses techniques par les gains en frais de personnel et que le résultat financier est globalement positif.

Une étude comparative a également été menée entre les rapports « coût-efficacité » de la ligne 4 pour différents niveaux d'automatisation et les mêmes rapports « coût-efficacité » pour un ensemble d'autres lignes du réseau de Berlin formant le réseau à « petit gabarit » (longueur totale 30 km, 4 lignes, fréquence 2 minutes).

Les différents niveaux d'automatisation vont de la suppression du personnel présent sur les quais à l'automatisation intégrale de l'exploitation en passant par la suppression du conducteur.

L'efficacité a été évaluée suivant différents critères de qualité :

- tels pour les voyageurs : le confort, la ponctualité, la sécurité, les informations;
- et pour l'exploitant : la flexibilité, la sécurité des installations, la capacité, les conditions de travail, les informations internes en vue de statistiques, etc.

Les résultats de cette analyse confirment l'intérêt de l'automatisation intégrale au niveau non seulement des coûts mais également de l'efficacité. De plus, l'extension de l'automatisation à un plus grand nombre de lignes rend ces résultats encore plus favorables, du fait des frais fixes qui proportionnellement seront moins élevés.

## 6 Uniformisation des méthodes d'évaluation du rapport coût/bénéfice

Le Groupe de travail composé de représentants des réseaux de Berlin, Hambourg et Lyon a tenté d'uniformiser, en fonction des études très détaillées entreprises par chacun de leur réseau, les méthodes d'évaluation du rapport coût/bénéfice.

Il s'est avéré que :

- 1) les trois réseaux ont des approches de l'automatisation différentes.

Lyon crée une nouvelle ligne entièrement automatisée, alors que Hambourg et Berlin réalisent des investissements complémentaires afin de rendre automatique, à des niveaux divers, l'exploitation d'une ligne traditionnelle existante.

Il convient donc de faire clairement apparaître le niveau d'automatisation considéré.

Ainsi, le *niveau 0* correspondrait à l'exploitation avec conduite manuelle et pas de personnel permanent en station.

Le *niveau 1* serait l'exploitation avec pilotage automatique et conducteur.

Le niveau 2 serait l'exploitation entièrement automatique.

Dans les études réalisées pour les trois réseaux, les coûts pour les lignes concernées ont été exprimés en montants absolus. Néanmoins, ces lignes se différencient par la longueur, le nombre de stations, le nombre et le type de rames, le nombre de voyageurs, etc. Pour pouvoir comparer les coûts entre eux, il faudrait déterminer des grandeurs spécifiques telles que coût/km de ligne, coût/voiture, coût/voiture et km, coût/place et km, ainsi que trouver un accord sur la monnaie et l'année de référence!

2) L'aspect juridique concernant les responsabilités des exploitants diffère largement d'un pays à l'autre. La séparation quai voie en cas d'automatisation intégrale comprend-elle l'obligation de l'installation de portes palières ou pas? Décision très importante quant au coût de l'investissement (transformation de stations existantes) et de maintenance. La conduite « full automatique » implique-t-elle encore la présence d'un homme à bord du train.

## 7 Conclusions générales

1) L'aspect rentabilité des réseaux prendra dans les décennies à venir de plus en plus d'importance. L'automatisation intégrale contribuera à influencer favorablement le rapport coût/rentabilité.

2) On peut affirmer en fonction des résultats de Lille et des études, recherches et essais déjà réalisés que:

- pour une nouvelle ligne de métro, l'automatisation va de soi;
- pour une ligne en cours de construction, l'automatisation a des arguments de poids;
- pour une ligne en exploitation, l'automatisation doit attendre l'opportunité d'un renouvellement important: achat de nouveau matériel roulant, remplacement de la signalisation, modernisation ou agrandissement de stations existantes.

3) La décision finale n'est plus du ressort exclusif des sociétés exploitantes. Le pouvoir politique peut influencer grandement le choix:

- participation du Ministère des recherches et technologies nouvelles dans les recherches et essais. Appui financier mais aussi logistique par l'entremise de personnel hautement qualifié;
- participation des chercheurs universitaires;
- appui des industries quant à la mise au point de technologies de pointe.

4) L'aspect social vis-à-vis du personnel des exploitants est à prendre en considération, principalement en cette époque de chômage important. Il y a toutefois lieu de tenir compte que:

a) en cas de construction d'un nouveau métro ou d'une nouvelle ligne, il y a création d'emplois supplémentaires;

b) en cas de modernisation d'un réseau ou d'une ligne existante, il y a affectation du personnel de conduite et de station à d'autres tâches par une présence dans les compartiments voyageurs et en station;

- politique de commercialisation plus poussée, aide et information aux voyageurs. Les utilisateurs sont demandeurs de systèmes de transport efficaces mais aussi humains;
- amélioration de la sécurité subjective. Une présence régulière en station et convois peut considérablement augmenter la sécurité subjective, diminuer le taux d'agressivité et les risques de vandalisme. Les dégâts occasionnés aux installations par des actions de malveillance prennent des proportions très préoccupantes dans l'ensemble des réseaux.
- contrôle plus intensif des titres de transport. Le nombre de voyageurs utilisant les transports en commun sans se munir d'un titre de transport en règle augmente sur la plupart des réseaux et atteint des pourcentages très élevés sur certains d'entre eux. Il y a lieu de combattre ce fléau journellement, et l'affectation partielle des conducteurs libérés de leur tâche initiale peut contribuer à redresser la situation sans augmentation du personnel;
- intervention rapide lors d'incidents techniques et d'exploitation. Ceci nécessite une formation initiale et de fréquents recyclages afin de transformer le conducteur de métro en un agent d'opérations en ligne.

Cette affectation multiple revalorise la fonction initiale des agents de conduite et de stations et en est donc un aspect très positif.

D'autre part, une absence non prévue d'un tel agent (maladie, accident, ...) ne diminue en rien la capacité de transport offerte à la population.

Les prestations de ce personnel « polyvalent » sont moins liées aux heures et périodes de pointe. Cela peut engendrer une amélioration des conditions de vie de ces agents.

5) Il découle du point précédent que dans le stade actuel de l'expérience, des études, des analyses et des essais, il est fortement conseillé pour les anciens réseaux de rechercher les moyens pour passer directement au stade « full automatique » en ce qui concerne la conduite des trains et de ne plus envisager un stade intermédiaire conduite automatique avec présence humaine permanente dans le poste de conduite.

6) Il y a lieu de se montrer très circonspect dans l'approche de l'analyse « coût bénéfice » car la valeur salariale peut différer grandement d'un continent à l'autre.

# Troisième partie : Nouveaux projets d'automatisation pour l'exploitation de rames sans conducteurs dans les transports publics urbains sur rail, y compris MASON\*

PAR

**Helmut DÖPFER,**

Dipl.-Ing., Geschäftsleiter Technik und Bau, Berliner Verkehrs-Betriebe (BVG),  
Berlin (Allemagne)

Permettez-moi d'abord de vous présenter un ensemble d'essais et de projets d'automatisation menés sur des lignes de métro en Allemagne fédérale y compris à Berlin Ouest.

Avant l'apparition de l'électronique sur les chemins de fer à traction électrique, vers la fin des années cinquante, des essais avaient été faits en exploitation dès 1930 et encore en 1957-58 pour transmettre les ordres de traction et freinage depuis la voie jusqu'à la cabine de conduite. La technologie des transitions devait, dans les années soixante,

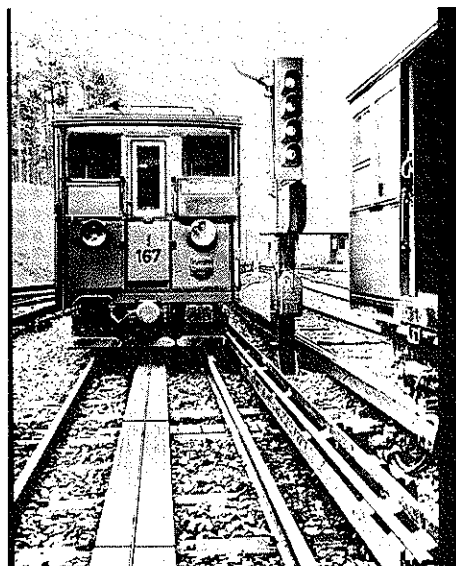


Fig. 1: Métro à petit gabarit du métro de Berlin. Premiers essais de transmission d'information par câble conducteur en voie, 1930.

**Linienzugbeeinflussung  
Probezug aus dem Jahre 1930**

permettre de développer des systèmes de pilotage automatique exploitables.

Dans une première phase de développement qui devait s'achever en 1972 avec l'ouverture du métro de Munich entièrement équipé en pilotage automatique, des sections d'essais avaient été équipées de câbles en voie aux métros de Hambourg et de Berlin. Deux systèmes différents de pilotage automatique avaient été essayés sur ces deux réseaux. Un système Siemens à boucles courtes à Berlin et un système A.E.G. à boucles longues à Hambourg.

Après 1972 c'est, outre Munich, Vienne en Autriche qui s'équipait en 1978 du même système de pilotage automatique.

Les conducteurs des trains étant désormais déchargés de la commande manuelle de la traction et

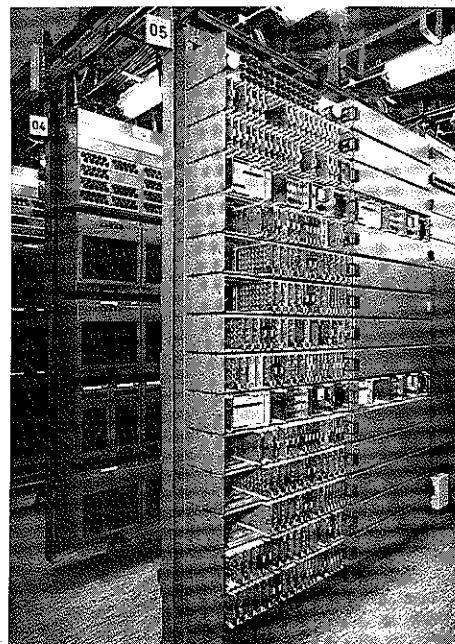


Fig. 2: Pilotage automatique LZB 500 au métro de Berlin. Equipement pour un poste d'aiguillage, deux chassis avec chacun deux équipements de voie. Un chassis avec ses capotages; un chassis sans capotage.

du freinage ainsi que de l'actionnement de la veille automatique (homme mort) se sont vu confier la responsabilité de la commande du départ du train après exécution du service des voyageurs.

Cette commande du départ du train après exécution du service des voyageurs se fait de façon différente dans les deux villes. A Munich, le conducteur sort

Fig. 3: Commande de départ du train au métro de Munich.



(\*) Système automatique modulaire à composants de sécurité pour les transports en commun.

de sa cabine, surveille l'échange des voyageurs depuis la tête du train et, «attaque» par un micro la sonorisation de quai (méthode du «cordon ombilical»). A Vienne, le conducteur reste dans sa cabine et surveille le quai grâce à des récepteurs de télévision ou un miroir placés sur le quai.

En acceptant sur ces deux réseaux automatiques nouveaux l'exploitation sans agent à quai on a donné, dans les années soixante-dix, le succès économique au pilotage automatique.

En même temps que cette première phase de développement de l'automatisation des transports en commun mobilisait les efforts des industries ferroviaire et électrique, plusieurs systèmes à cabines ont été développés et essayés en Allemagne qui, dès l'origine, ont été conçus pour être exploités sans conducteur.

Après les essais à Munich-Allach du système Transrapid-Takt de Krauss Maffei à grandes cabines suspendues magnétiquement, des installations expérimentales pour grandes ou petites cabines ont vu le jour dans diverses villes d'Allemagne.

A *Wetter sur la Ruhr*, DEMAG et MBB (Messerschmidt Bolkow Blöhm) ont essayé le système CAT. Les deux sens de circulation circulent sur une même poutre porteuse avec des petites cabines propulsées à 36 km/h par des moteurs linéaires. C'est de là qu'est né le système C-Bahn à grandes cabines de Demag et MBB dont l'application a été envisagée à Hagen, Hambourg et Berlin.

A *Erlangen*, Siemens et DÜWAG (Düsseldorfer Waggonfabrik) ont développé et essayé le système H-Bahn à grandes cabines suspendues. Des cabines de 42 places circulent en exploitation cadencée auto-



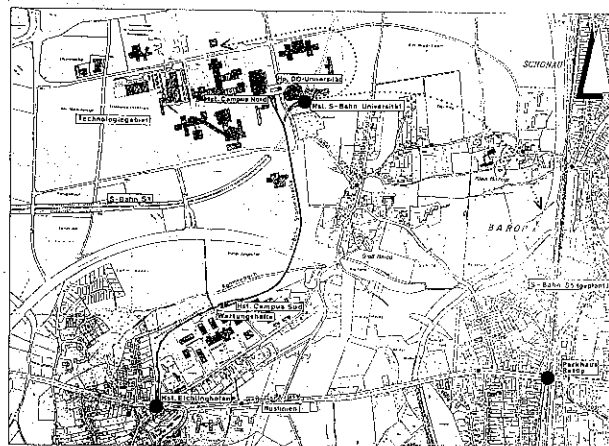
Fig. 4 : Le H-Bahn de l'Université de Dortmund. Arrivée d'un véhicule au point d'arrêt n° 1 de la station AVZ (Centre de construction et d'administration).

matique à 50 km/h. La propulsion est assurée par des moteurs à courant continu entraînant des roues à bandages caoutchouc.

Après divers projets d'application, entre autres pour un système à cabines à Berlin, le début des années quatre-vingt voyait naître le H-Bahn de l'Université de Dortmund (figure 4).

On trouvera dans la documentation technique du H-Bahn les détails techniques sur ce système et sur son système de commande et régulation à deux blocs URTL de sécurité.

A *Dortmund*, le H-Bahn relie deux centres universitaires au moyen d'une ligne d'environ 1 km de long



— ligne actuelle.  
- - - prolongement d'Eichlinghofen.  
... prolongement ultérieur.

Fig. 5 : La ligne de H-Bahn de Dortmund et ses prolongements.

empruntée chaque année par quelque 650 000 personnes. Les prolongements envisagés au tronçon initial (figure 5) comprennent une intégration au réseau des transports en commun de Dortmund (correspondance avec le S-Bahn de Dortmund). L'étude a été achevée en 1988.

A *Brunswick (Braunschweig)*, AEG et la société à responsabilité limitée du système à sustentation magnétique de Starnberg ont, depuis la fin des années soixante-dix, essayé pendant plusieurs années sur un circuit d'essai le système M-Bahn à grandes cabines sustentées magnétiquement et dont la propulsion à champ mobile dans la voie consomme moins d'énergie grâce à un moteur linéaire à stator long.

Ces essais techniques d'un système magnétique ont débouché en 1981, après comparaison avec d'autres systèmes à cabines mais à roulement sur piste (H-Bahn, C-Bahn) sur le projet d'une ligne de 1,6 km de long entre la station de métro Gleisdreieck et la Kemperplatz près de la salle de l'orchestre philharmonique de Berlin.

Cette ligne qui comportera une station intermédiaire à Bernburger Strasse doit permettre de tester l'exploitation avec voyageurs sans conducteur ni agent d'accompagnement. La ligne empruntera en partie l'ancien tracé de métro en direction de la



Fig. 6 : Le M-Bahn de Berlin.

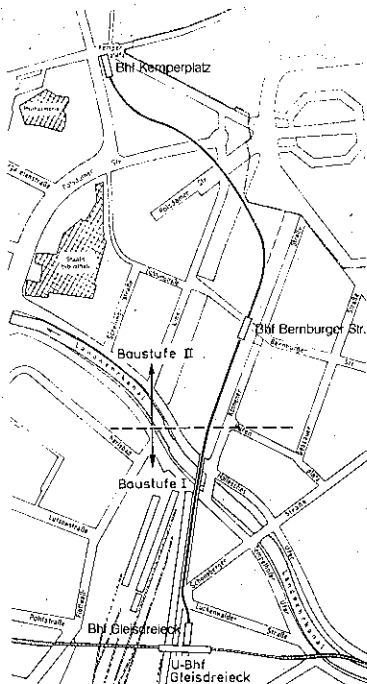
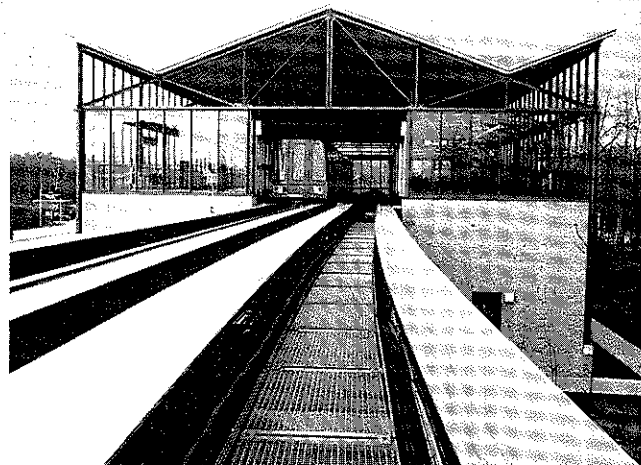
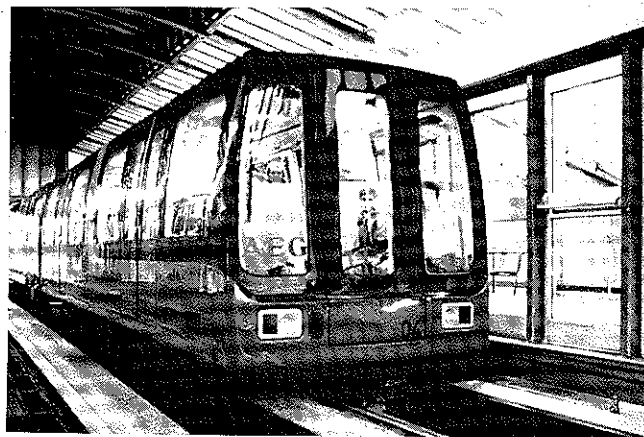


Fig. 7: Le tracé du M-Bahn de Berlin de Gleisdreieck à Kemperplatz via Bernburger Strasse.

Fig. 9: Un train M-Bahn à deux voitures du type M 80/2 avec les portes palières à quai.

Fig. 10: La voie aérienne du M-Bahn. Un véhicule à quai. Station Kemperplatz à Berlin.



Potsdamer Platz puis avec une voie en viaduc jusqu'au terminus de Kemperplatz.

Cette ligne sera exploitée avec quatre véhicules expérimentaux qui en dimensions et en capacité correspondent à peu près aux voitures à petit gabarit du métro de Berlin et ont été construits entre 1983 et 1986.

Comme sur le H-Bahn de Dortmund les quais du M-Bahn sont équipés de portes palières séparant les voitures du quai.

Pour revenir sur les controverses de ces dernières années pour savoir si les portes palières de façade de quai sont nécessaires en exploitation d'un mode de transport guidé sans conducteur ou bien si des systèmes avertisseurs en nez de quai sont suffisants, disons simplement que pour le M-Bahn, la hauteur du quai par rapport à la voie, déterminée dans les modes

L'ouverture des portes palières est interdite en sécurité jusqu'à ce que le train soit immobilisé en station. Celui-ci n'est autorisé à repartir en sécurité qu'après refermeture des portes palières commandée depuis le poste central (pupitre de droite avec les écrans de télévision pour surveiller les quais et les accès).

La surveillance des stations par télévision a pu être limitée pour les trois stations à neuf écrans et treize caméras car les portes palières rendent inutile la surveillance de l'échange des voyageurs et des portes des voitures. Les portes des voitures sont ouvertes manuellement par les voyageurs et se referment automatiquement après un temps prédéterminé.



Fig. 8: Le terminus de Kemperplatz du M-Bahn de Berlin avec la voie aérienne.

classiques par la hauteur des bogies portant les moteurs de traction et les transmissions de mouvement aux essieux, est à peu près au même niveau.

En station, les portes palières empêchent de venir marcher sur la voie. L'ouverture et la fermeture des portes sont commandées depuis le poste de commande centralisée installée en station à Kemperplatz.

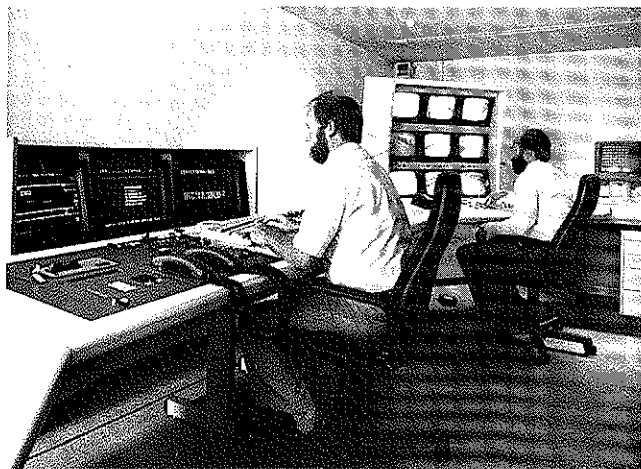


Fig. 11: Poste de commande centralisée du M-Bahn de Berlin. Les pupitres de commande et les écrans de télévision. Commande centralisée du mouvement des trains et des autorisations de départ des trains.



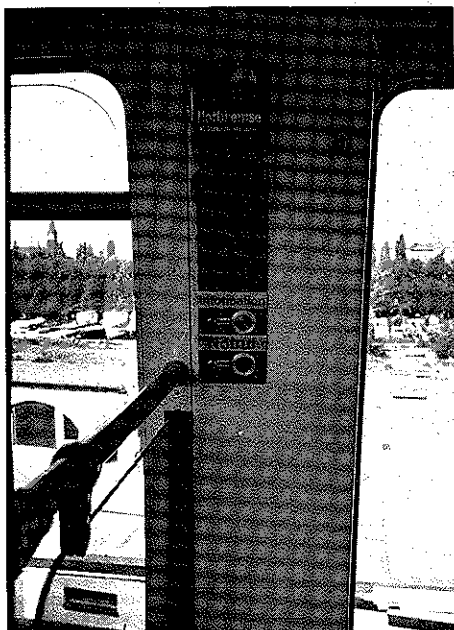


Fig. 12: Interphone à disposition des voyageurs dans une voiture de M-Bahn.



Fig. 13: Face avant d'une voiture de M-Bahn sans cabine de conduite mais avec une issue de secours.

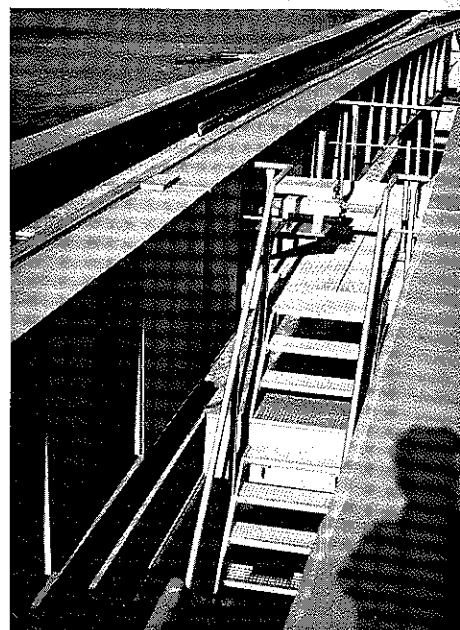


Fig. 14: Escalier de secours de la voie M-Bahn vers le niveau de la rue.

Nous avons renoncé sciemment à la surveillance de l'intérieur des voitures puisque celle-ci pourrait être rendue inopérante par des actes de vandalisme.

Pour communiquer avec le poste central, les voyageurs disposent de deux interphones dans chaque voiture de chaque train constitué sur ce tronçon d'une motrice articulée double.

Outre les agents du poste de commande centralisée, la surveillance de l'exploitation hors de ce poste est assurée par un « superviseur du mouvement » qui se tient sur le terrain à la disposition des voyageurs en cas d'évènement particulier.

J'en arrive au problème central de tous les modes sans conducteur, à savoir les stratégies en cas de perturbation.

Les compartiments voyageurs s'étendent jusqu'aux parois frontales des voitures. Ces parois portent des portes de sortie de secours qui permettent aux voyageurs, en cas d'arrêt entre stations, de quitter la voiture en descendant sur la voie sous la surveillance du « superviseur du mouvement » et même sans celui-ci en cas d'incendie d'une voiture. Le cheminement d'évacuation conduit, entre les voies à des escaliers de secours spécialement aménagés et conduisant au niveau de la voie publique.

En cas d'avarie ou d'incident des automatismes ou du système de propulsion, les éléments M-Bahn avec leurs voyageurs sont remorqués jusqu'à la prochaine station par un véhicule de secours prêt à intervenir et stationné à Gleisdreieck. A cet effet, une commande de secours installée sous un siège de voyageur est utilisée par le superviseur du mouvement.

Je renonce à décrire des équipements techniques du M-Bahn, de réalisation de la voie, de l'alimentation en énergie du champ mobile du moteur linéaire, de la commande et de la commutation des sections de stator long ainsi que des équipements de pilotage automatique et de protection des trains; un document qui est disponible contient tous ces renseignements sur le M-Bahn.

En ce qui concerne la mise en service, je peux vous informer de ce qu'après d'importants essais

d'homologation de la sécurité et des stratégies en cas de perturbations, le processus d'autorisation a abouti à la fin de 1988. La fiabilité d'exploitation du M-Bahn a été testée et démontrée depuis 1987 par une exploitation quotidienne avec et sans voyageurs (trajets avec des groupes pendant des mois entiers).

Les deux projets, H-Bahn de Dortmund et M-Bahn de Berlin, qui sont des modes sans conducteur ni agent d'accompagnement, en correspondance avec les transports en commun, ont, pour les experts, une importance particulière dans les deux domaines *des stratégies en cas de perturbation* et *des procédures d'autorisation* en particulier pour le passage de l'exploitation en pilotage automatique avec conducteur à l'exploitation vraiment sans conducteur. En ce qui concerne le troisième problème important, à savoir l'acceptation par les voyageurs, on peut dire que celle-ci a été positive pour les deux projets.

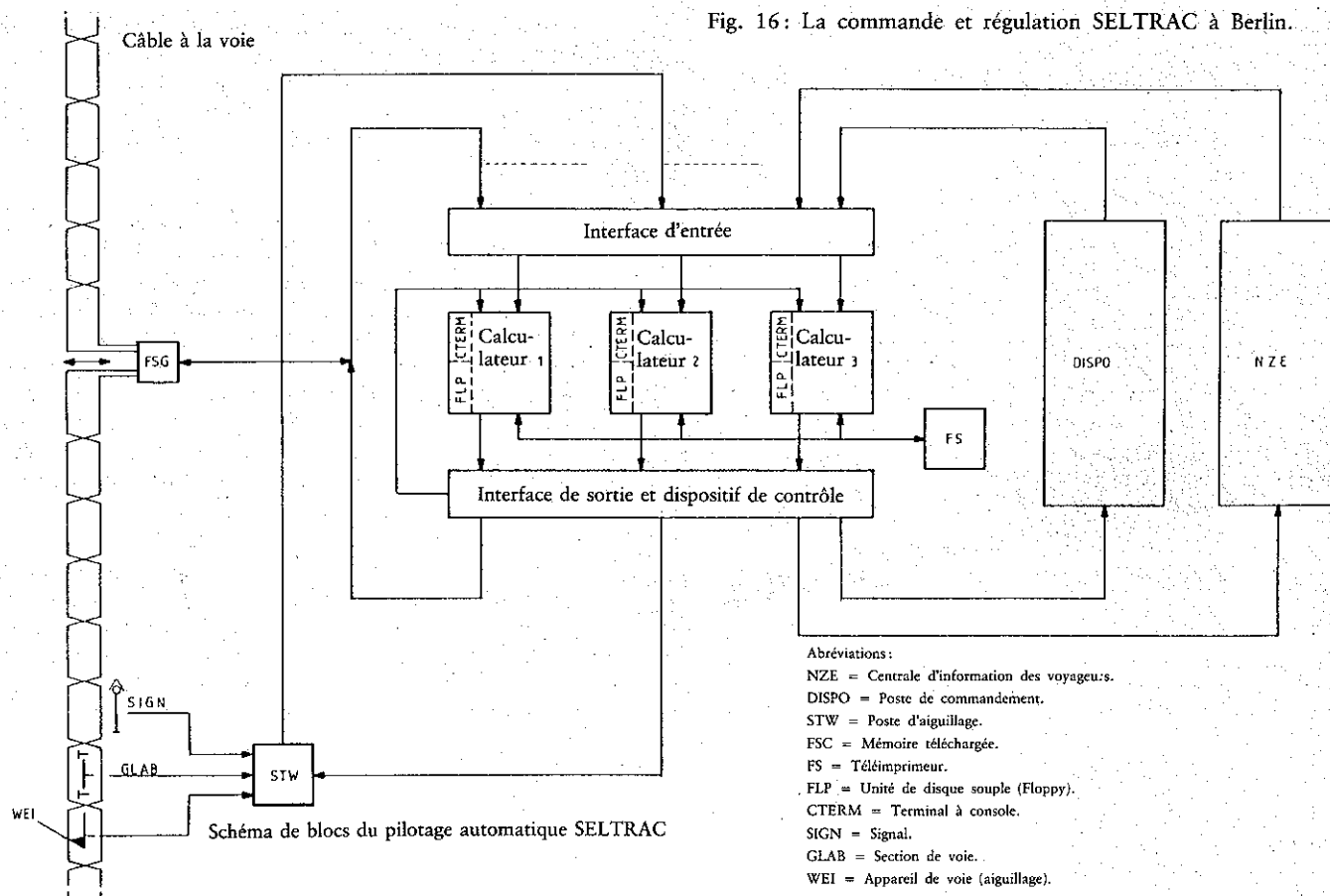
Deux autres applications de M-Bahn sans conducteur sont actuellement en projet :

- A Las Vegas, un M-Bahn d'environ 2 km doit relier le terrain de la foire-exposition et le centre ville. Une réalisation est prévue pour 1990 avec trois éléments de deux voitures.
- A Francfort sur le Main, un système à cabines est prévu, qui doit être réalisé en M-Bahn et reliera



Fig. 15: Véhicule d'intervention du M-Bahn.

Fig. 16 : La commande et régulation SELTRAC à Berlin.



— vers 1992 estime-t-on — le terminal central de l'aéroport Rhin-Main et le nouveau terminal Est.

Revenons maintenant des systèmes à cabines à l'exploitation des métros sans conducteur.

Dans une seconde phase de développement, à partir du milieu des années soixante-dix, autrement dit après que le pilotage automatique eût fait ses preuves au métro de Munich, c'est à nouveau aux métros de Berlin et de Hambourg que deux grandes firmes allemandes d'électricité, SEL (Standard Elektrik Lorenz) et Siemens ont développé deux systèmes d'automatisme à base d'ordinateur, respectivement SELTRAC et PUSH.

Les calculateurs de processus de ces systèmes de commande électrique de la génération qui succède au simple pilotage automatique assurent non seulement la commande en sécurité du train en marche mais commandent et contrôlent également tous les équipements en station et en ligne et assurent la commande d'ensemble du mouvement.

Les concepts d'exploitation des deux projets de recherche SELTRAC et PUSH incluent désormais la faisabilité de l'exploitation sans conducteur.

Les essais pratiques avec voyageurs de ces deux systèmes d'automatisation ont eu lieu sur des lignes prises à titre d'essai sur les réseaux de métro de Berlin et Hambourg. Ils ont été menés en étroite coopération entre les entreprises d'électricité et les réseaux :

**SELTRAC** sur la ligne U4 du métro de Berlin. En service depuis 1981 (antérieurement : sur la section d'essais entre Bülowstrasse et Gleisdreieck.

**PUSH** sur la ligne U1 du métro de Hambourg. En service depuis 1983 (sections d'essai Volksdorf-Grosshansdorf et Volksdorf-Hoisbüttel)

Il a été rendu compte en détail de ces deux projets, de leurs organes et des expériences acquises en exploitation.

Je me limiterai à cette constatation essentielle que ces deux projets de recherche ont apporté la preuve, en exploitation sur les métros allemands dans la première moitié des années quatre-vingt, que l'exploitation automatisée est possible sans conducteur ni agent d'accompagnement.

Dans les deux projets l'exploitation sans conducteur ni personnel de quai avec une commande centralisée des autorisations de départ des trains depuis un poste central a apporté la preuve de sa validité.

On sait que la commande centralisée des autorisations de départ des trains est pratiquée sur plusieurs réseaux régionaux (S-Bahn) du chemin de fer fédéral allemand.

Le système SELTRAC, expérimenté avec succès à Berlin, a été depuis installé au Canada sur une ligne du métro de Toronto et sur une ligne à Vancouver.

Les deux réseaux, Berlin et Hambourg, ont encore de grandes longueurs de lignes en tunnels construits au premier tiers de notre siècle. Il n'y a donc pas de priorité financière à transformer tout le réseau de métro en vue d'une exploitation sans personnel à bord des trains, les moyens étant surtout consacrés, comme pendant les deux dernières décennies, à la modernisation et au renouvellement des matériels roulants vétustes, au remplacement de postes d'aiguillage âgés et au renforcement de l'alimentation en énergie.





## Arbeitsschwerpunkte

1. Sicherheitsproblematik / Sicherheitsnachweis
2. Technische Zuverlässigkeit
3. Störfall-Strategien
4. Akzeptanzproblematik
5. Betriebskonzept
6. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen

<b>IFB</b>	MASON Arbeitsschwerpunkte	German 880219
------------	------------------------------	------------------

- 1 Problèmes de sécurité.
- 2 Fiabilité technique.
- 3 Stratégies en cas de perturbation.
- 4 Problèmes d'acceptation par les voyageurs et le personnel.
- 5 Influences sur le principe d'exploitation.
- 6 Etudes économiques.

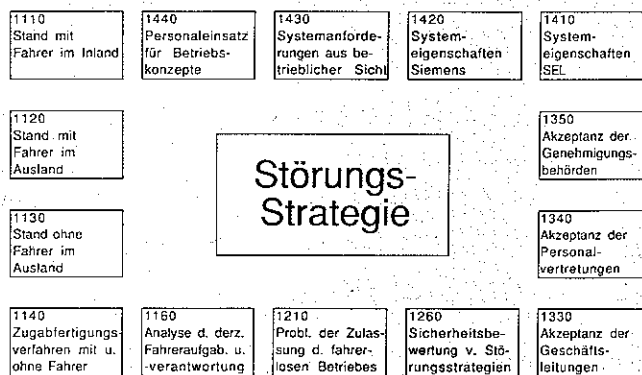
Fig. 19: Principaux domaines de travail du programme MASON.

Cette illustration montre aussi l'effet des stratégies en cas de perturbation, sur l'acceptation par le public.

Le projet démarré depuis lors ne comporte pas seulement les recherches mentionnées, effectuées par des experts en chemin de fer de l'industrie, des réseaux et des autorités de contrôle mais devra, dans la phase suivante, comporter la réalisation et l'exploitation d'une section prototype dans chacun des trois domaines de transport en commun ferroviaire des grandes villes :

- sur un réseau de métro;
  - sur un réseau régional (S-Bahn)
- et, après avoir fait des expériences d'exploitation sans conducteur,
- sur un métro léger.

L'exploitation sans conducteur mais avec agent d'accompagnement devra être pratiquée, au moins en phase initiale.



<b>IFB</b>	MASON Einwirkung der Störungsstrategie	German 871209
------------	---	------------------

- 1110 = Situation avec conducteur en Allemagne.  
 1120 = Situation avec conducteur à l'étranger.  
 1130 = Situation sans conducteur à l'étranger.  
 1140 = Procédures d'autorisation de départ avec ou sans conducteur.  
 1160 = Analyse des tâches et responsabilités actuelles du conducteur.  
 1210 = Problèmes d'autorisation de la mise en service sans conducteur.  
 1260 = Evaluation de la sécurité et stratégies en cas de perturbation.  
 1330 = Acceptation par les directions d'entreprises.  
 1340 = Acceptation par les représentants du personnel.  
 1350 = Acceptation des autorités de contrôle.  
 1410 = Propriétés du système SEL (SELTRAC).  
 1420 = Propriétés du système SIEMENS (PUSH).  
 1430 = Spécifications du système vues par l'exploitant.  
 1440 = Utilisation du personnel pour les principes d'exploitation.

Fig. 20: Stratégies en cas de perturbation.

Les villes et réseaux ci-après ont à ce jour prévu de participer ou ont manifesté leur intérêt aux actions d'automatisation de la phase 2 du projet :

- Berlin (BVG): Réseau régional (S-Ban).
- Francfort sur le Main: Métro ou métro léger.
- Cologne (Réseau municipal et ligne Cologne-Bonn): Métro léger.
- Munich: Métro.
- Réseau de tramways Rhin-Ruhr: Métro léger.

PAR

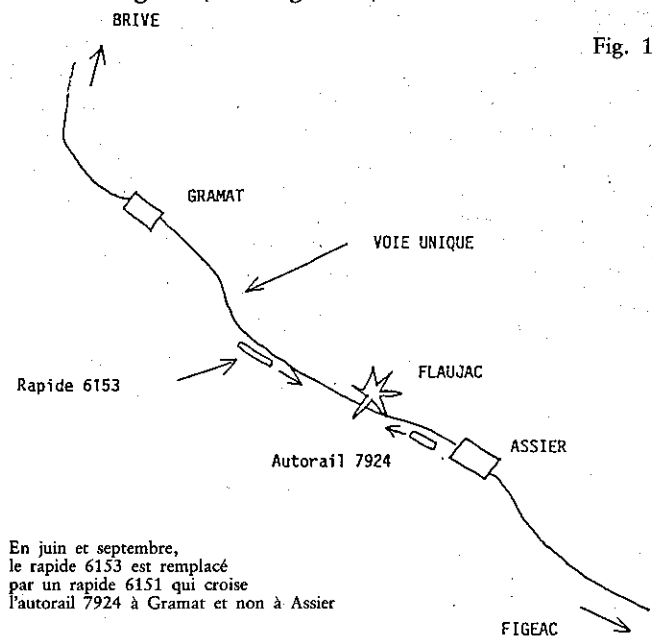
Robert GABILLARD,

Professeur, Université de Lille I

(Université des Sciences et Techniques de Lille), Villeneuve d'Ascq (France)

## 1 Exemple d'accident dû à l'erreur humaine

Le samedi 3 août 1985, le chef de gare d'Assier fait partir un autorail. Cinq minutes plus tard cet autorail entre en collision nez à nez avec le rapide Paris-Rodez à Flaujac sur la ligne à voie unique de Brive à Figeac (voir figure 1).



Cet accident qui a causé la mort de 32 personnes et fait 86 blessés est l'exemple même de l'erreur humaine et son analyse peut nous apprendre beaucoup sur la manière dont celle-ci est engendrée.

L'autorail est un train régulier numéro 7924 circulant tous les jours. Le rapide de numéro 6153 ne circule que le samedi en période de plein été. Le croisement des deux trains s'effectue à Assier.

Le chef de gare d'Assier avait tout préparé pour effectuer ce croisement dans sa gare.

Mais, ce jour-là, le rapide avait 15 minutes de retard au départ de Brive, et le régulateur du PC de Toulouse n'avait pas jugé utile d'en informer les chefs de gare intéressés. Aucun règlement ne l'obligeait d'ailleurs à le faire.

Sur les lignes à voie unique, dépourvues comme c'était le cas de tout automatisme, la sécurité repose essentiellement sur le respect, par les chefs de gare des deux gares adjacentes, de l'ordre normal de succession des trains et, des règlements concernant le cantonnement téléphonique.

Chacun de ces agents de circulation doit, avant de donner le départ à un train, l'annoncer par téléphone, en précisant son numéro, à son collègue qui doit l'enregistrer sur un registre et s'interdire d'envoyer en sens inverse un autre train avant d'avoir reçu le train annoncé.

Ce jour-là à 15 h 32, l'agent de Gramat annonce le train 6153 à Assier, qui l'enregistre, à tort sous le n° 7921, ce dernier circulant tous les jours sauf le samedi. Puis, à 15 h 40, Gramat expédie le train 6153 vers Assier.

Mais, à cause du retard du rapide, l'autorail attendait à Assier depuis déjà un certain temps, et son chef de train s'impatiente et déclare au chef de gare d'Assier « qu'il devait changer de train à Gramat pour emprunter le rapide, et que l'on perdait du temps à Assier ».

Pour tout exploitant perdre du temps, sans raison valable, est une faute grave, et ce reproche du chef de train inquiète le chef de gare.

Il se trouve qu'il rentrait de vacances et qu'il n'était pas le titulaire de la gare d'Assier. Il effectuait habituellement des remplacements. Il reprenait son service ce jour même et confiant dans sa mémoire, il n'avait pas jugé bon d'étudier à nouveau en détail la succession des trains qu'il devait recevoir et faire partir.

En plus de son rôle d'agent chargé de la sécurité, il devait aussi accomplir des fonctions commerciales.

Pourquoi le rapide n'est-il pas déjà là?...

Au lieu de penser à un retard possible, le malheureux chef de gare pense que son collègue de Gramat lui a peut-être fait une *annonce conditionnelle*.

Car il existe un article du règlement qui prévoit que : « si un train X doit être expédié immédiatement après l'arrivée d'un train Y, il peut être annoncé avant l'arrivée de ce train, mais l'annonce doit alors être exprimée comme suit : « Bien qu'attendant le train Y, j'annonce le train X ».

Le chef de la gare d'Assier ne se rappelle plus bien ce que lui a exactement dit au téléphone son collègue de Gramat. Dans le doute il court à son bureau consulter le tableau de succession des trains.

Ce tableau est la bible du chef de gare, il le renseigne sur tous les trains qui doivent passer dans sa gare. Mais il est très complet, il comprend tous les trains, pour tous les jours de la semaine, pour la période dite d'été, s'étendant de fin mai à fin septembre.

Dans sa précipitation, l'homme se trompe de colonne et il lit que l'autorail 7924 doit croiser à Gramat le rapide 6151.

C'est presque le même numéro, mais c'est le service de juin et septembre et non celui du mois d'août où l'on se trouvait. De plus l'agent de Gramat n'avait pas précisé le numéro du train qu'il annonçait.

Pour lui il n'y a plus de doute : son collègue lui a fait une annonce conditionnelle, le rapide est simplement à Gramat en train d'attendre l'autorail, et, lui, va être la cause d'un retard injustifié.

Il n'y a plus de temps à perdre, il décroche son téléphone, annonce l'autorail à son collègue de Gramat, et sort sur le quai faire partir l'autorail.

Pourquoi le chef de gare de Gramat n'a-t-il pas crié dans son appareil que le rapide était déjà parti ?

Peut-être son collègue d'Assier, dans sa précipitation a-t-il raccroché sans lui laisser le temps de le faire ?

Ce point n'est pas très clair. Mais on peut lire dans un rapport officiel : « Au surplus l'agent de Gramat a tout d'abord pensé à une annonce conditionnelle malgré le non-respect du libellé de cette annonce ».

Lorsque l'agent de Gramat, inquiet, a enfin pu ré-obtenir son collègue au téléphone, l'autorail était parti, l'accident était devenu inévitable.

Ainsi dans ce cas particulier, l'erreur humaine n'est pas attribuable à une méconnaissance du règlement, mais à son application partielle et incorrecte. Ce qu'il est possible de reprocher aux deux chefs de gare est d'avoir annoncé les trains sans préciser leurs numéros et d'avoir cru peut-être l'un après l'autre (et à coup sûr en ce qui concerne l'agent d'Assier, que son collègue avait prononcé la phrase : « Bien qu'attendant le train Y... » alors qu'il ne l'avait pas fait, puis d'avoir agi comme si elle avait été dite.

Mais l'homme possède un cerveau, extraordinaire machine, capable de comprendre le sens d'un message même s'il en manque une partie, et de le faire si efficacement et si discrètement que son propriétaire est persuadé que le message était complet.

Cette caractéristique est d'ailleurs l'une des composantes de l'intelligence humaine. Peut-on reprocher à un homme d'appartenir à une espèce intelligente ?...

En ne condamnant les deux chefs de gare qu'à des peines légères, le tribunal correctionnel de Cahors ne l'a pas fait.

Dans la genèse de l'accident de Flaujac, il faut distinguer trois raisons principales :

- La première est la nécessité de concilier en permanence la mission de l'exploitant qui est de suivre les horaires et de ne perdre aucun instant, et l'obligation d'assurer la sécurité qui impose de respecter des règles strictes.  
Le souci de la sécurité doit avoir priorité sur celui du respect de l'horaire. Mais l'accident est, heureusement, un événement rare, alors que faire respecter l'horaire est un travail permanent. Et ceci explique que cet ordre de priorité puisse s'inverser dans la tête d'un homme et créer ainsi l'un des facteurs de beaucoup d'accidents.
- La deuxième raison est la complexité qui est dangereuse lorsqu'elle peut être une source de confusion. Le tableau de succession des trains affiché à Assier ne comportait que 7 trains par jour. Ce n'était pas trop complexe, mais cependant s'il n'avait contenu que les informations relatives aux deux mois de plein été (juillet et août), le chef de gare n'aurait pas commis la confusion fatale.
- La troisième raison est la présence au sein du règlement de l'article relatif à l'annonce conditionnelle.

L'ingénieur qui a écrit cet article l'avait certainement fait avec les meilleures intentions du monde. Il s'agissait simplement d'éviter la perte de temps (voir

la première raison) qui consistait pour le chef de gare, après avoir reçu le train Y, à aller dans son bureau annoncer le train X, puis à revenir sur le quai faire partir ce dernier.

Jamais personne ne s'était douté que cet article pouvait un jour contribuer à causer plusieurs dizaines de morts. Pendant de nombreuses années il n'avait fait aucun mal, mais il était comme une bombe non explosée qui n'attendait que la conjonction de plusieurs circonstances anormales de l'environnement (le retard non signalé du rapide, le chef de gare qui rentrait de vacances et n'avait pas rafraîchi sa mémoire en relisant le tableau succession des trains...) pour accomplir son œuvre de mort.

Dans d'autres accidents créés par l'erreur humaine, le scénario est différent mais on retrouve presque toujours la même triologie :

- l'existence d'une préoccupation urgente ou d'un objectif secondaire, liée la plupart du temps aux impératifs de l'exploitation, qui réussit à prendre dans le fonctionnement cérébral d'un responsable plus d'importance immédiate que le souci permanent d'assurer la sécurité;
- la complexité des tâches à accomplir qui peut croître de manière dangereuse lorsqu'un incident, ou même un simple retard, crée un régime dégradé.
- enfin l'existence dans le règlement, auquel l'homme doit obéir, de dispositions pouvant prêter à confusion lorsque se produit la conjonction de certaines anomalies de l'environnement. Ces défauts du règlement sont souvent presque impossibles à découvrir et ils ne sont, hélas, révélés qu'à la faveur d'un accident.

Leur équivalent dans les systèmes informatiques est l'erreur de programmation.

## 2 Le cas des métros

Si j'ai choisi dans les annales des chemins de fer l'exemple d'accident dont j'avais besoin pour illustrer ma communication, c'est parce que le cas de Flaujac, sur lequel des informations précises étaient devenues disponibles après la clôture de l'action judiciaire, m'a semblé être le plus révélateur de la manière dont l'erreur humaine peut être engendrée malgré la compétence de ses auteurs et leur désir de bien faire.

En ce qui concerne les métros, je ne connais aucun exemple de ligne à voie unique exploitée sous le régime du cantonnement téléphonique.

Pratiquement tous les réseaux possèdent au moins une signalisation à bloc système automatique et la sécurité, dans l'ensemble, y est très satisfaisante.

En 1972, la Direction des transports terrestres du Ministère français des transports a fait effectuer une étude statistique des accidents dans les divers modes de transports [1]. On lit dans cette étude que durant la décennie allant de 1963 à 1972, on relève seulement sur le réseau ferré de la RATP 4 collisions qui sont toutes dues à une erreur du personnel de conduite (non respect des signaux).

Si l'on considère que durant cette décennie les rames de la RATP ont parcouru environ 2 milliards de kilomètres à une vitesse commerciale n'excédant pas 25 km/h, on peut en déduire que la probabilité

de collision par heure était seulement de  $5.10^{-8}$ . Ceci correspond à une performance considérée comme bonne dans le domaine de la sécurité.

La tendance actuelle à la suppression totale du personnel de conduite et à son remplacement par des automatismes ne trouve donc pas sa véritable justification dans la recherche d'une meilleure sécurité.

La véritable raison de l'automatisation est de répondre à la demande de plus en plus pressante de la clientèle pour une meilleure qualité de service, tout en maintenant la sécurité au niveau le plus élevé possible, et en tout cas à un niveau non dégradé par rapport à ce que permettait l'utilisation de l'homme, tout en supprimant des tâches humaines très répétitives et peu motivantes.

### 3 La chaîne causale des accidents

L'un des types d'accident collectif les plus néfastes pour l'image de marque d'un exploitant est la collision.

La figure 2 montre, à titre d'exemple, la chaîne causale de ce type d'accident.

Cette figure permet de calculer, au moins théoriquement, la probabilité de collision qui est :

$$P_c = P_o \cdot P_d \cdot P_a$$

avec  $P_d$ , probabilité d'un dépassement du point d'arrêt imposé.

$$P_d = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7$$

Dans le cas de la catastrophe de Flaujac (collision nez à nez) cette figure pourrait se réduire aux deux premiers blocs à condition de les intituler :

$P_o$  = Présence du train croiseur dans la section de voie unique.

$P_1$  = Non détection du train croiseur.

Il était normal d'avoir  $P_o = 1$  (il faut bien exploiter les voies) et c'est le premier bloc qui avec  $P_1 = 0$  aurait dû empêcher l'accident (comme il le fait habituellement).

L'accident de Flaujac va encore nous permettre d'expliquer le bloc intitulé : *Non détection de l'erreur à temps ou impossibilité de la corriger*.

En effet, le chef de gare d'Assier a été averti de son erreur au moins quatre minutes avant la collision et s'il avait pu communiquer par radio avec les conducteurs des convois, l'accident aurait été évité.

La SNCF a donc fait un gros effort d'équipement radio de son matériel de traction.

Mais cet équipement n'a pas permis d'empêcher la collision du 27 juin 1988 à la gare de Lyon, qui est imputable à une erreur humaine ayant conduit à l'isolement de la plus grande partie du système de freinage de la rame amont (bloc P6 de la figure 2). Le fait que le conducteur a pu prévenir par radio de cette défaillance ne permettait évidemment pas d'arrêter la rame folle, et cette information est arrivée trop tard pour que les aiguilleurs puissent diriger le train vers une voie où l'accident aurait fait moins de victimes.

Dans l'étude statistique que nous avons déjà mentionnée [1], on peut trouver l'information que presque toutes les collisions qui se sont produites dans la décennie 1963-1972 ont été causées par le bloc P3 de la figure 2, c'est-à-dire par une mauvaise observation ou une non-obéissance aux signaux par le personnel de conduite.

De nombreux dispositifs ont été imaginés et mis en service pour tenter de remédier à ce type de

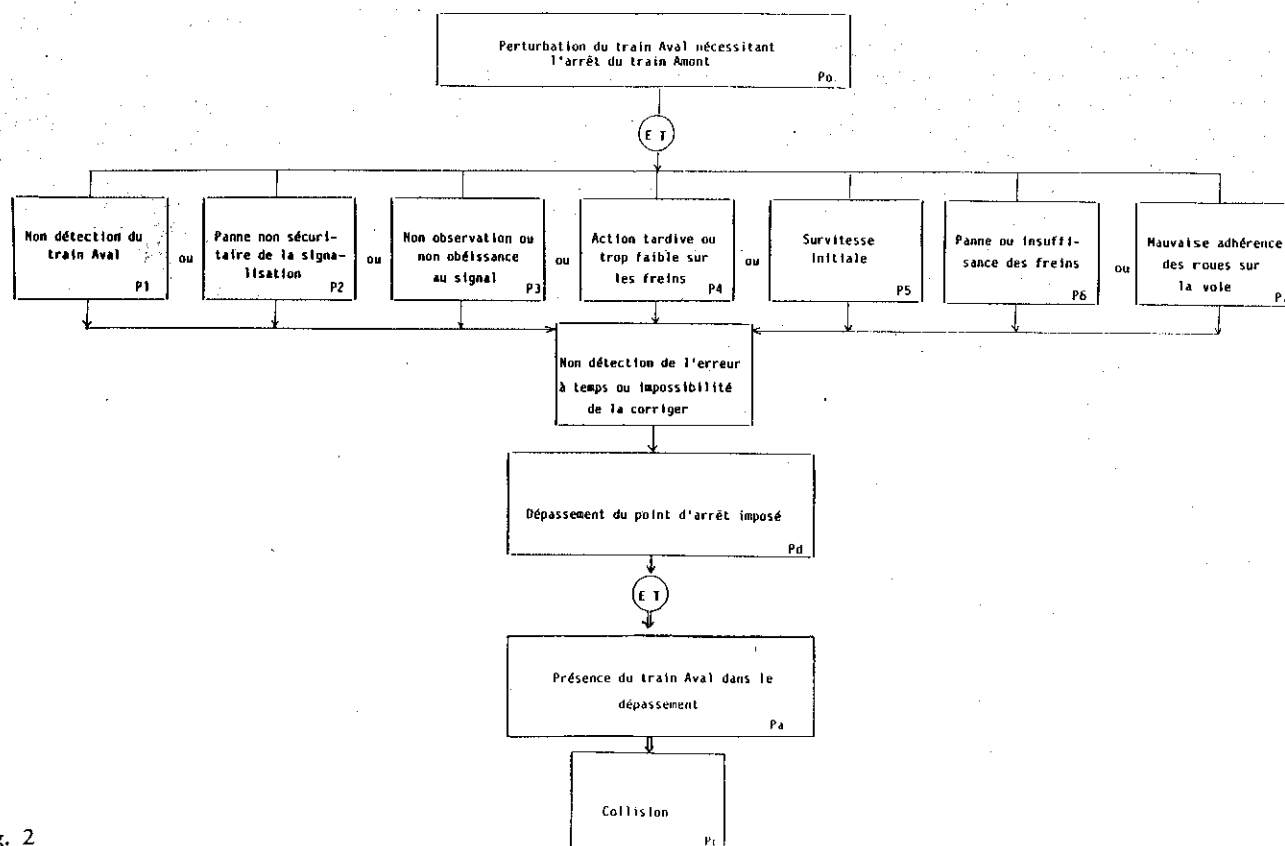


Fig. 2

défaillance humaine: le contrôle de vigilance, le classique crocodile, la répétition des signaux en cabine, etc... et la bande de l'enregistreur Flaman qui permet de sanctionner un conducteur qui n'a pas observé un signal ou qui a commis une survitesse... (bloc P5).

Tous ces dispositifs (à condition qu'ils ne soient pas en panne) permettent la plupart du temps à l'homme de corriger son erreur (bloc en bas et à gauche sur la figure 2).

Néanmoins on peut lire dans le rapport déjà cité [1] que des collisions par non respect des signaux se sont produites dans 15 cas sur 19, malgré une répétition en cabine fonctionnant parfaitement.

Ainsi, il semble bien établi que la majorité des accidents serait due à des erreurs humaines.

Et puisqu'il est impossible de calculer la probabilité de défaillance d'un homme la chaîne causale de la figure 2 n'a qu'une utilité qualitative à chaque fois que l'homme est encore chargé d'assurer la sécurité de l'un de ses maillons.

Il en est autrement lorsqu'il est possible de faire accomplir toutes les fonctions de cette chaîne par des automatismes. Dans ce cas, le calcul de fiabilité des divers composants permet de *répartir harmonieusement* les efforts à accomplir pour obtenir une probabilité globale d'accident suffisamment faible. En effet, il ne servirait à rien de dépenser une fortune pour réaliser un système de signalisation infaillible (blocs P1 et P2), si ensuite l'opérateur chargé du bloc P3 (que ce soit une machine ou un homme) ne respecte pas les signaux, même une fois sur mille.

#### 4 L'apparition des automatismes

L'évolution à laquelle on assiste actuellement est une invasion par les automatismes des divers blocs de la figure 2 où ils remplacent les actions sécuritaires antérieurement effectuées par les hommes.

Pour ne pas remonter aux origines mêmes du chemin de fer, nous dirons que l'on est parti d'une situation où seuls les blocs P1 et P2 étaient automatisés: c'était la classique signalisation du type block système électrique à relais.

Ensuite l'étape la plus importante a été accomplie par les réseaux qui comme la RATP ont, à partir de 1965, développé le pilotage automatique. C'est en 1968 que la RATP l'a mis en service sur la ligne 11 de son réseau.

Cette étape consistait à ajouter aux blocs P1 et P2 déjà automatisés des automatismes accomplissant les fonctions sécuritaires des blocs P3, P4 et P5.

Comme nous l'avons déjà précisé l'objectif recherché n'était pas tellement d'accroître la sécurité, qui était déjà bonne, que d'améliorer la qualité de service.

En effet, en garantissant le respect des vitesses limites (bloc P5), une action très rapide sur les freins (bloc P4) et une obéissance inconditionnelle aux signaux (bloc P3), l'automatisme permettait d'augmenter la fréquence des rames et par suite la capacité de transport des lignes en heure de pointe. Enfin, l'asservissement de la vitesse à une grecque disposée sur la voie permettait, non seulement d'éviter les survitesses, mais aussi d'assurer un arrêt de précision en station.

Cette automatisation a permis à la RATP de passer à une exploitation à un seul agent par rame,

ce qui réalisait déjà un gain de productivité appréciable.

Toutefois il n'a pas été possible de supprimer ce dernier agent, en grande partie pour des raisons sociales, mais surtout parce que, en 1968, les automatismes électroniques étaient une innovation récente, d'une fiabilité qui était encore mise en doute par beaucoup d'ingénieurs, et la présence d'un homme dans la cabine de conduite était précieuse pour reprendre en manuel en cas de panne de l'automatisme, et assurer ainsi une bonne disponibilité.

Après 1968 l'idée de supprimer totalement l'homme des cabines de conduite des véhicules de transport était dans l'air, et quelques réalisations ont vu le jour principalement sur le continent américain et au Japon: desserte interne de l'exposition internationale de Montréal, desserte de parcs d'attractions, d'aéroports, etc... Ces tentatives se sont faites à faible vitesse, et quelquefois en maintenant la présence d'un homme qui ne servait à rien d'autre que rassurer les voyageurs.

C'est aussi en 1969 qu'ont débuté les études du VAL qui, inauguré en 1983 à Lille a été le premier métro urbain entièrement automatique.

Bien qu'ayant été personnellement à l'origine de leur conception, je ne vous parlerai pas des automatismes du VAL. Ce n'est pas le sujet de ma communication. Je vous dirai simplement qu'à partir du moment où leur intégration définitive et leur mise au point ont été terminées, ils n'ont donné lieu à aucun accident.

Cette affirmation est seulement la constatation d'un fait.

Il faut toutefois remarquer que même l'automatisme intégral du VAL ne remplace pas l'homme dans la totalité des blocs de la figure 2.

Le fonctionnement correct des freins dépend du bon travail du personnel d'entretien, et l'adhérence de la voie peut devenir mauvaise en particulier l'hiver sur le viaduc. La sécurité dépend alors des opérateurs humains du poste de contrôle qui doivent mettre en marche le chauffage des pistes de roulement s'il y a risque de verglas, et s'il y a lieu, limiter la vitesse et la fréquence des rames.

L'automatisme du VAL nécessite donc quand même la vigilance d'hommes qui, comme sur tous les autres systèmes de transport, *doivent obéir à un règlement précis.*

#### 5 Hypothèses sur la nature de l'erreur humaine

La question que l'on peut se poser est:

«Pourquoi l'homme, qui a su écrire des règlements dont le respect rigoureux empêcherait les accidents (Règlements des chemins de fer, code de la route, etc...) est-il incapable de les respecter tout le temps scrupuleusement?»

Je pense que les progrès accomplis de nos jours par la psychologie expérimentale, par la neurologie, par les chercheurs en intelligence artificielle, et surtout l'apparition d'un nouveau type de machine informatique appelée «Neuro-Ordinateur» ou «Réseau de Neurones» permettent d'apporter à cette question au moins un début de réponse.

La réponse provisoire que je propose est la suivante :

*L'homme se trompe en créant quelquefois involontairement, et malgré son désir de bien faire, des accidents dramatiques, parce qu'il est intelligent et que son cerveau ne fonctionne pas comme une machine de Von Neumann.*

Une telle réponse (que je vous demande quand même de n'accepter qu'avec beaucoup de prudence) nécessite évidemment des explications.

### 5.1 Les machines de Von Neumann

Tous les ordinateurs classiques sont des machines de Von Neumann. Ils fonctionnent en exécutant séquentiellement un *programme* dont chaque instruction est stockée à un endroit *bien défini* d'un circuit électronique qui leur sert de mémoire.

Ce programme est tout à fait analogue au *règlement* dont chaque article est inscrit à une page bien définie d'un livre identifiable par son numéro, qui joue le rôle de l'adresse d'une instruction du programme de l'ordinateur.

Une fois le règlement transformé en programme, il peut être entré dans la mémoire de l'ordinateur et celui-ci *ne peut pas faire autre chose* qu'exécuter rigoureusement ce programme, c'est-à-dire *respecter le règlement*.

Si le règlement est bon, et *s'il n'y a pas d'erreurs de programmation*, il ne peut donc pas se produire d'accident sauf en cas de détérioration d'un circuit interne de l'ordinateur.

L'objectif de toutes les recherches actuelles sur l'automatisation des systèmes de transports est la construction de machines de Von Neumann dont l'architecture réalise d'une manière ou d'une autre la condition *d'arrêter tous les trains qu'elles contrôlent*, (c'est-à-dire de les mettre dans leur état de sécurité) *s'il se produit une détérioration quelconque de leur structure interne*.(\*)

Mon propos n'est pas de vous parler de ces recherches si ce n'est pour dire que certaines de ces machines existent déjà (en particulier l'automatisme du VAL), plusieurs sont en service à l'étranger, et en France le SACEM sera bientôt utilisable et sera l'automatisme de sécurité le plus moderne.

### 5.2 Les neuro-ordinateurs

L'idée de comprendre la nature de l'intelligence humaine, puis de construire des machines fonctionnant comme le cerveau humain (et qui seraient par suite intelligentes) est très ancienne.

Déjà en 1854 l'ouvrage fondamental de Georges Boole, qui a donné naissance à l'algèbre dont on se sert pour concevoir les ordinateurs, portait pour titre : « Sur une investigation des lois de la pensée ».

Dans la décennie 1940-1950 on trouve des titres tels que : « Sur le calcul logique des idées immanentes dans l'activité nerveuse [2] ; « Les machines à penser » [3], etc...

Ces ouvrages étaient des études théoriques et les rares tentatives expérimentales de construction de machines intelligentes n'avaient donné aucun résultat.

En 1960, à l'Université Cornell, Franck Rosenblatt construit le « Perceptron », une machine capable d'apprendre à reconnaître les lettres de l'alphabet à la manière d'un jeune enfant [4-5]. Toutefois cette machine ne parvient pas à faire plus, et pendant vingt ans ces recherches ont été éclipsées par le développement fulgurant des ordinateurs fonctionnant suivant le principe de Von Neumann.

En 1982, nos connaissances sur la structure et le fonctionnement du cerveau avaient considérablement progressé [6], et, parallèlement la technologie de construction des circuits VLSI à très grande intégration était devenue disponible. Un article du physicien américain John Hopfield relance alors les recherches sur les réseaux de neurones artificiels [7] et en 1987 des réalisations industrielles de neuro-ordinateurs sont déjà disponibles commercialement [8].

Pour un spécialiste des technologies ferroviaires, la meilleure façon de comprendre ce qu'est un neuro-ordinateur consiste à partir de la structure d'un poste d'aiguillage classique à relais électro-mécaniques.

Cette machine logique est constituée de composants tous semblables : les relais, interconnectés entre eux par un câblage.

La mémoire des actions que ce poste d'aiguillage a à accomplir est contenue dans ce câblage. Elle est *répartie* dans toute l'installation et non pas localisée à des adresses bien définies d'un composant servant de mémoire, comme dans une machine de Von Neumann.

Ainsi c'est dans son câblage que réside la mémoire de ce qu'un poste d'aiguillage doit faire : c'est son « règlement ». S'il n'y a pas d'erreur de conception dans ce « règlement », tant que les relais fonctionnent correctement, et si la structure du câblage n'est pas modifiée (\*) il ne peut pas se produire d'accident.

L'architecture d'un neuro-ordinateur ressemble à celle d'un poste d'aiguillage car il est formé d'un grand nombre de cellules toutes semblables interconnectées par un câblage. Mais la différence est que *ce câblage peut se modifier sous l'influence des signaux qui le parcourent*.

Plus exactement les cellules, qui simulent le fonctionnement des neurones, sont assemblées en couches successives, et chaque cellule d'une couche est reliée à toutes les cellules des couches adjacentes par des réseaux sommateurs dont les gains peuvent se modifier par rétroaction. Suivant que la somme des signaux reçus par une cellule dépasse ou non un certain seuil, celle-ci change d'état (0 ou 1) et elle envoie ou non un signal aux autres cellules qui lui sont connectées.

Cette architecture ressemble à celle du cerveau humain dont on sait que les neurones sont répartis en couches et qu'ils transmettent ou non un influx nerveux par leurs axones, suivant la valeur du seuil d'excitation résultant des activités chimiques cumulées des milliers de synapses qui les relient aux autres neurones des autres couches.

(\*) Un accident de ce type, dû encore à l'erreur humaine peut se produire : en mai 1965 sur le métro berlinois un ouvrier qui effectuait une soudure dans une armoire de signalisation fait un faux mouvement qui court-circuite deux fils. Il en résulte l'excitation intempestive d'un relai, puis une collision qui fait 1 mort et 98 blessés.

(\*) Voir la remarque située à la fin de cette communication.

Cette architecture semblable confère au neuro-ordinateur un comportement semblable à celui du cerveau humain.

Il n'est pas possible de le programmer comme on le fait pour un ordinateur ordinaire. *On ne peut lui enseigner ce qu'il a à faire que par apprentissage en lui fournissant des exemples.*

La première couche de cellules peut être reliée à une rétine photo électrique sur laquelle on peut projeter une image et la dernière couche peut être reliée à des effecteurs commandant une machine.

Si on projette sur la rétine d'un neuro-ordinateur, dont les effecteurs sont reliés aux commandes d'un train, l'image d'un signal fermé, il faudra *forcer* les cellules de la couche reliée aux commandes à agir sur les freins. Grâce aux rétroactions internes ce forçage agit alors sur les gains de l'ensemble des réseaux sommateurs, et, après plusieurs répétitions de cette leçon, le neuro-ordinateur freinera son train *de lui-même* à chaque fois qu'il verra un signal fermé.

Il semble bien qu'un élève conducteur apprenne de la même manière à respecter les signaux.

Il serait très dangereux de confier la conduite d'un train à un neuro-ordinateur et le seul intérêt actuel de cette machine est de commencer à nous montrer comment et pourquoi l'homme se trompe.

### 5.3 Le cerveau humain

Un homme peut apprendre par l'éducation et l'entraînement un nombre gigantesque de connaissances diverses. Il semble bien que ces connaissances ne soient inscrites à aucun endroit localisé de manière microscopique dans son cerveau (comme elles le sont dans la mémoire d'une machine de Von Neumann). Elles sont diffuses et réparties sous la forme d'activité chimique plus ou moins grande de centaines de millions de synapses occupant de vastes zones de la matière cérébrale. Chaque nouvelle connaissance acquise, tout nouvel influx sensoriel, modifie plus ou moins cet ensemble de propriétés chimiques. *Et ce jeu complexe crée l'intelligence de l'homme.*

Mais ce sont ces continuelles modifications qui, tout en lui conférant son extraordinaire adaptabilité, font de l'homme un être faillible.

Un neuro-ordinateur peut aussi acquérir des connaissances diverses, chaque nouvelle acquisition modifie un peu la répartition des gains de ses réseaux sommateurs. Mais on constate qu'au-delà d'une limite (qui dépend de son nombre de cellules élémentaires) tout nouvel enseignement efface progressivement la mémoire des enseignements effectués les premiers.

Un cerveau humain semble se comporter de la même manière et on constate que les connaissances qu'il a acquises s'estompent si, pendant une période assez longue il ne les utilise plus, ou s'il se livre à une autre activité.

Toutefois les souvenirs d'expériences souvent vécues et les actes quasi-automatiques résultant de la routine d'un métier ne disparaissent jamais complètement.

Lorsqu'un homme est confronté à une situation d'urgence, *qui ne lui laisse pas un temps de réflexion suffisant*, c'est dans cette routine que son cerveau va chercher les données dont il va se servir pour élaborer son action. Malheureusement ces données ne sont pas toujours bien adaptées à la situation présente.

Revenons alors à l'accident de Flaujac.

Malgré l'obligation que lui en fait le règlement, un chef de gare ne regarde pas tous les matins le tableau de succession des trains, car il finit par le savoir par cœur, ou du moins il le croit.

Mais les vacances qu'il venait de prendre avaient certainement rendu floue cette connaissance dans la mémoire du chef de gare (comme ce serait le cas dans celle d'un neuro-ordinateur) et c'est pour cela qu'à un moment il n'a plus très bien su si les trains devaient se croiser chez lui ou à Gramat.

Il a alors consulté le tableau affiché dans son bureau, pensant pouvoir solutionner ainsi, tout seul, le problème du lieu de croisement des trains. Mais c'est en lisant trop précipitamment ce tableau qu'il s'est embrouillé dans les numéros de trains, et qu'il s'est enfermé dans son erreur tragique.

Le tableau de succession des trains est un élément indispensable à l'exploitation d'un système de transport, que ce soit un réseau ferroviaire ou un réseau de métro. A ce titre il est affiché dans toutes les gares et postes de contrôle du monde. Mais il n'est pas un élément intrinsèquement sécuritaire. Le lieu de croisement de deux trains, ainsi que leurs numéros, sont des données nécessaires à l'exploitation, et non à la sécurité. Pour assurer cette dernière il est nécessaire et suffisant d'acquiescer la certitude qu'une section de voie est effectivement libre avant d'y envoyer un train.

*C'est ce que font tous les automatismes sans avoir besoin de connaître les numéros des trains.*

Dans un métro entièrement automatique, comme par exemple, celui de Lille, les organes qui assurent cette fonction sécuritaire sont strictement séparés de ceux qui assurent la souplesse de l'exploitation et le respect de l'horaire. Ils ne peuvent donc pas se gérer mutuellement. Ni faire autre chose que ce qu'ils doivent faire.

Mais avec des opérateurs humains il est difficile d'empêcher que l'intelligence intrinsèque de l'homme n'intervienne en interprétant plus ou moins les règlements et en prenant des habitudes plus ou moins bonnes.

Or il n'existe pas de cloisons étanches dans un cerveau humain entre les différentes informations qu'il possède en mémoire, et dans certaines situations d'urgence, les habitudes prises au cours de la routine de l'exploitation peuvent interférer de manière quelquefois néfaste avec les réflexes sécuritaires, qui devraient être les seuls à intervenir.

C'est pour cela : « qu'il faut admettre que la machine humaine n'est pas absolument fiable et que l'erreur humaine est une donnée de base qui possède une certaine probabilité d'occurrence ».

## 6 Conclusion

La conclusion qui semble se dégager de cette analyse est qu'il vaut mieux faire conduire un train, ou confier des tâches impliquant le respect absolu d'un règlement à une machine de Von Neumann plutôt qu'à un opérateur humain.

Ceci milite en faveur de « l'Automatisation Intégrale du Mouvement des Trains » inscrite au programme de la RATP et déjà réalisée, ou en cours de réalisation dans d'autres réseaux.



Cette automatisisation implique la mise au point de dispositifs, câblés ou informatiques, fonctionnant en sécurité. C'est un problème technologique extrêmement difficile *mais résoluble*, alors que la mise en sécurité du cerveau humain, de par son principe de fonctionnement, *ne sera jamais possible*.

Mais pour des raisons, tant sociales que budgétaires, il ne sera pas possible à tous les réseaux d'effectuer rapidement cette mutation. Il faudra pendant longtemps encore faire appel à l'homme.

Alors il faut apprendre à mieux l'utiliser, *en tenant compte de ses faiblesses qui sont la rançon de son intelligence*.

Les auteurs des règlements devraient avoir ce souci et ne jamais faire reposer toute la sécurité sur le respect absolu de ce qu'ils écrivent.

Et surtout ne pas mélanger des dispositions indispensables à la sécurité avec d'autres ne servant qu'à faciliter l'exploitation.

Malheureusement ce conseil est plus facile à donner qu'à suivre. (\*)

La formation initiale du personnel doit être faite en insistant sur les exemples pratiques. Puis tout au long de leur vie professionnelle il faut donner aux agents chargés d'actions sécuritaires la possibilité d'entretenir leurs connaissances en leur ménageant chaque année un nombre suffisant de journées de formation continue.

Il serait souhaitable que ces hommes puissent disposer de simulateurs avec lesquels ils pourraient s'entraîner, comme le font les pilotes de ligne, à réagir correctement à des situations imprévues.

Enfin, il me semblerait souhaitable de les faire réfléchir et de les mettre en garde contre les pièges que peut leur tendre leur propre cerveau.

(\*) Un moyen terme consiste à adjoindre à l'homme des automatismes partiels qui s'opposent à ses erreurs les plus dangereuses.

## Remarque

La définition du § 5.1. correspond à la notion de « *Sécurité intrinsèque* » en usage dans les chemins de fer et qui tire parti de l'existence de l'état de sécurité correspondant à l'arrêt de l'ensemble des véhicules circulant sur un tronçon de voie.

On lui oppose fréquemment la notion de « *Sécurité probabiliste* » qui est utilisée pour l'étude des automatismes mettant en œuvre des microprocesseurs. Mais ces appareillages comportent toujours en bout de chaîne un organe de décision qui fonctionne en sécurité intrinsèque. Par suite la définition du § 5.1. leur est également applicable à condition de les considérer dans leur ensemble et non pas dans leurs parties.

## Références

- [1] « La sécurité dans les transports collectifs - Analyse des accidents dans les modes actuels » - Rapport principal du BCEOM - Octobre 1973.
- [2] McCulloch, W.S., and W. Pitts - « A logical calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity » - Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 5, pp. 115-133, 1943.
- [3] Couffignal - « Les machines à penser » - Les Editions de Minuit - Février 1952.
- [4] F. Rosenblatt - « Principles of Neurodynamics » - New York, Spartan Books (1959).
- [5] A. E. Brain, E. G. Forsen, N. J. Nilsson and C. A. Rosen - « Learning Machines » - International Science and Technology, Novembre 1962, pp. 20-30.
- [6] « Le cerveau » - Bibliothèque pour la Science - Berlin, 1981.
- [7] Hopfield, J. J. - « Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities » - Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, vol. 79, pp. 2554-2558, Avril 1982.
- [8] « Recherche: Vers le Neuro-ordinateur » - Micro-Systèmes, pp. 85-95 - Octobre 1987.



## Cinquième partie : Conclusions

PAR

Hans-Hermann MEYER,

Prof., Dipl.-Ing., Vorstandsmitglied, Hamburger Hochbahn AG, Hambourg (RF Allemagne),  
Président du Comité international des métropolitains de l'UITP

Depuis le début de la présente décennie, de nombreuses entreprises ont commencé à s'interroger sur l'automatisation de leurs métros et à voir si celle-ci constituait une réponse à long terme aux besoins futurs de l'entreprise en matière de capacité de transport et d'économie et aux attentes des voyageurs en matière d'attractivité du transport. Ces dernières années, le développement s'est considérablement intensifié, en particulier par la mise en service de nouveaux métros entièrement automatiques. Aujourd'hui, plus d'un million de voyageurs circulent déjà quotidiennement dans des trains sans conducteur. De nombreux pays ne construisent plus de métro sans en avoir d'abord envisagé l'automatisation intégrale.

L'exploitation des réseaux entièrement automatiques montre que les industriels ont porté la technologie et la fiabilité des équipements à des niveaux qui permettent d'assurer une excellente offre de transport. On a vu sur les systèmes en exploitation que la fiabilité des automatismes est supérieure à celle des hommes.

De bons moyens de communications apportent, sur les réseaux automatisés, une aide efficace pour lutter contre le vandalisme et les agressions contre les voyageurs.

Bien qu'il n'existe encore aucune méthode unifiée reposant sur des bases généralement admises pour faire des comparaisons économiques détaillées, les études économiques des réseaux construits ou en projet montrent qu'un réseau entièrement automatique conduit, à capacité de transport égale, à des économies tant d'investissements que de charges d'exploitation. Les économies apparaissent être d'autant plus significatives que la décision d'exploiter en automatisme intégral a été prise plus tôt au cours de l'étude.

Au contraire des réseaux ou lignes neufs, l'automatisation intégrale de lignes existantes — pour intéressante qu'elle puisse paraître aux plans amélioration de la souplesse d'exploitation, augmentation de l'offre et réduction des coûts — constitue encore aujourd'hui un problème complexe. Outre les modifications techniques, structurelles et de personnel, la transformation de réseaux existants représente des investissements significatifs qui ne peuvent être entrés que difficilement dans les calculs de rentabilité. Il faut poursuivre

les études et réflexions déjà très diverses entamées afin de développer des procédés et techniques qui permettront de faire passer progressivement des lignes existantes à l'exploitation entièrement automatique. Il convient de rechercher des voies et moyens, en particulier pour des raisons économiques, afin d'éviter, ou de mettre en œuvre le moins longtemps possible, les solutions intermédiaires telles que la marche automatique avec un conducteur à bord du train. Ces solutions intermédiaires sont toutefois inévitables lorsqu'on ne peut pas interrompre complètement l'exploitation pendant la phase d'installation.

La décision de mise en œuvre de réseaux entièrement automatiques n'est plus aujourd'hui entre les seules mains des entreprises exploitantes. Elle est affectée de façon décisive par des considérations politiques. Lors de la transformation en automatisme intégral, les entreprises de transport reçoivent :

- l'aide financière et logistique d'organismes d'état pour les recherches et essais;
- la participation des personnels hautement qualifiés des instituts de recherche et des grandes écoles;
- l'aide des industriels lors du développement des systèmes techniques nécessaires.

La production la plus économique possible de prestations de transport sera encore un but essentiel des entreprises de transport dans les décennies à venir. L'automatisation intégrale pourra apporter une contribution positive à la rentabilité.

Sur la base des résultats des réseaux déjà en exploitation et des études, recherches et essais déjà effectués, on peut affirmer que :

- l'exploitation automatique constitue la meilleure solution pour une ligne de métro neuve;
- d'importants arguments plaident en faveur de l'automatisation d'une ligne en cours de réalisation;
- il faut renoncer à l'automatisation d'une ligne exploitée jusqu'au moment où interviendront d'importants investissements, par exemple dans le domaine des matériels roulants ou de la signalisation.

