

25 27

SYSTEMES DE TRANSPORT AU

CANTONS FIXES

CONSIGNE DE VITESSE PAR CANTON

PROGRAMME DE VITESSE
INSCRIT SUR LA VOIE

CANTONS DEFINIS PAR MES
POTENTIEL OU DE COU

USA

| | |
|--------------------------------|--|
| WESTINGHOUSE | ATLANTA Airport GATWICK Airport DIVERS |
| WESTINGHOUSE Corp | |
| BART | SAN FRANCISCO |
| WESTINGHOUSE Corp | |
| AIRTRANS | DALLAS Airport |
| VOUGHT | |
| KOBE PORTLINER | KOBE |
| KAWAZAKI | |
| OSAKA NEW-TRAM | OSAKA |
| NIIGATA Licence VOUGHT | |
| METRO DE LYON | LYON |
| ALSTHOM-ATLANTIQUE | |
| METRO DE MARSEILLE | MARSEILLE MONTREAL |
| JEUMONT - SCHNEIDER | |
| METRO DE LONDRES | LONDRES |
| METRO DE LONDRES | |
| MORGANTOWN | MORGANTOWN |
| BOEING | |
| FAIRLANE SYSTEM | FAIRLANE |
| FORD | |
| VONA | YUKARIGAOKA NAGOYA |
| NIHON SHARYO SEIZO & MITSUI Co | |
| JETRAIL | DALLAS Airport |
| TRANSPORTATION SYSTEMS CENTRE | |
| DUKE UNIVERSITY | DUKE |
| OTIS | |

F

| | |
|----------------|--------------------------|
| VAL | LILLE |
| MATRA | |
| METRO DE PARIS | PARIS MEXICO, CARACAS |
| RATP | |

F

USA

| |
|--------------------------|
| UMI SYSTEM |
| UNIVERSAL MOBILITY (UMI) |
| C. BAHN |
| MBB |

RFA

USA

USA

J

J

F

F

GB

USA

USA

J

USA

USA

TRANSPORT AUTOMATIQUES GUIDES

2527

CANTONS MOBILES DEFORMABLES

SYSTEMES A VEHICULE PASSIF

DEFINIS PAR MESURE DE
TENSION OU DE COURANT

AUTRES SYSTEMES

| | |
|----------|-----------------|
| M | KING'S DOMINION |
| TY (UMI) | MINNESOTA ZOO |
| | ZIEGENHAIN |

| | | |
|-------|------------------------|------------------------------|
| (C) | ICTS / système SELTRAC | VANCOUVER |
| | UTDC | DETROIT |
| (F) | ARAMIS | Site d'essais |
| | MATRA | |
| (RFA) | S - BAHN | MUNICH |
| | SIEMENS | |
| (GB) | MAGLEV | BIRMINGHAM Airp ^t |
| | GEC & BRITISH RAILWAYS | |
| (RFA) | H - BAHN | DORTMUND |
| | SIEMENS & DUEWAG | |
| (B) | TAU | Site d'essais |
| | ACEC, BN, CRTH | |

| | | |
|-------|----------------------|---------------------------|
| (USA) | WEDWAY | HOUSTON Airp ^t |
| | WALT DISNEY Co | DISNEY WORLD |
| (RFA) | M - BAHN | BERLIN |
| | MAGNETBAHN | |
| (J) | CTM | Site d'essais |
| | FURUKAWA | |
| (F) | POMA 2000 | LAON |
| | POMA 2000 | |
| (USA) | ASCENSEUR HORIZONTAL | TAMPA |
| | OTIS | |

LES GRANDES FAMILLES DE TRANSPORTS
AUTOMATIQUES GUIDES



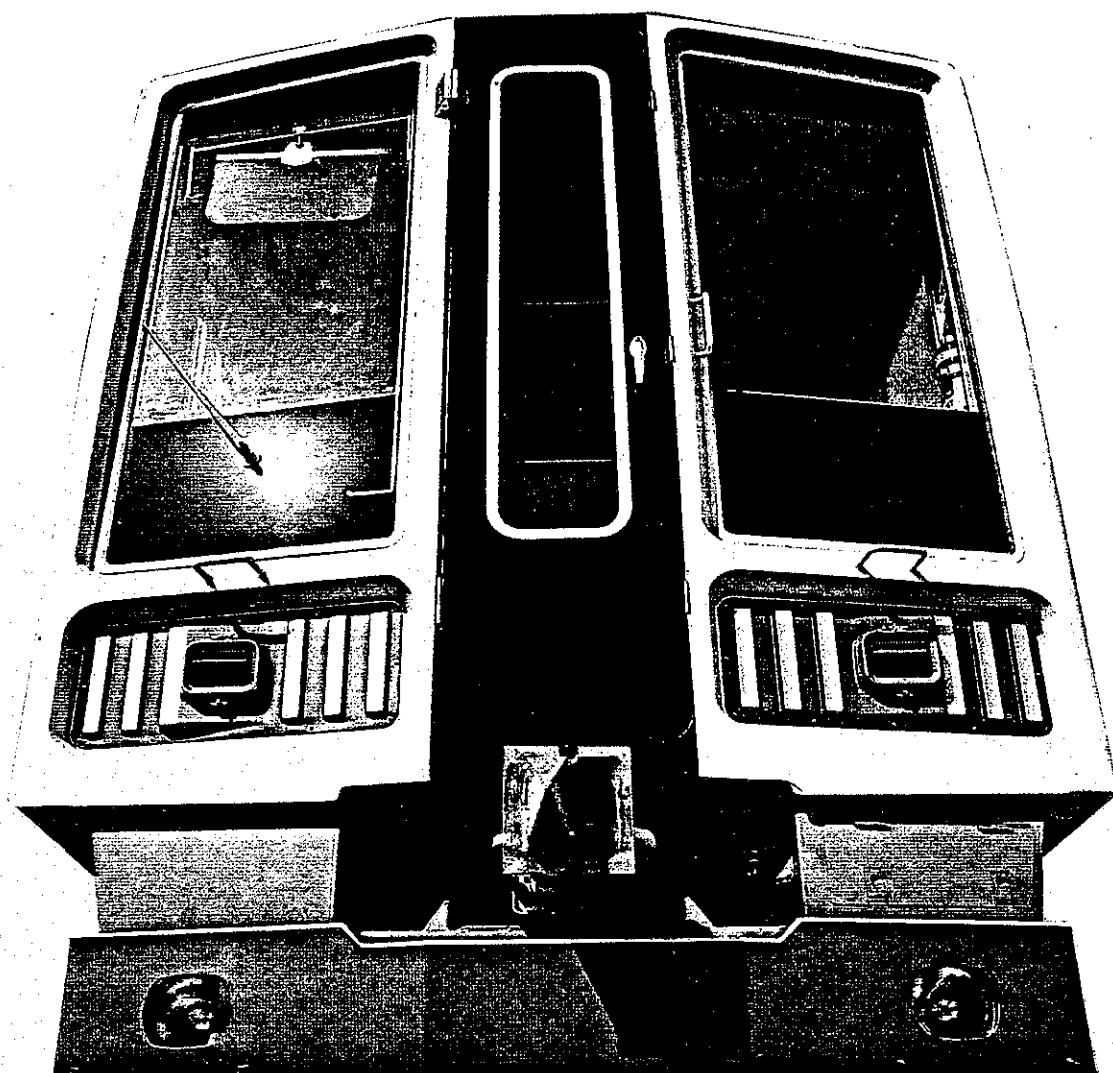
CRESTA

INSTITUT de RECHERCHE des TRANSPORTS

Centre de Recherche et d'Evaluation des Systemes
de Transport Automatises

2527

LES SYSTEMES DE TRANSPORT AUTOMATIQUES GUIDES DANS LE MONDE



Rédacteur : E. TAVERNIER

JUIN 85 - 163

S O M M A I R E

| | Page |
|---|------|
| Remerciements | 2 |
| Introduction | 3 |
| Les différents systèmes | 6 |
| Présentation générale des systèmes | 8 |
| <u>LES PRINCIPALES FONCTIONS DE PILOTAGE AUTOMATIQUE ET DE SECURITE</u> | |
| Détection de présence | 13 |
| Sécurité anti-collision | 14 |
| Régulation de vitesse et détection de survitesse | 43 |
| Sécurité des enclenchements d'itinéraires | 46 |
| Arrêt en station | 51 |
| Supervision du réseau | 62 |
| Conclusion générale | 65 |
| Bibliographie | 69 |

Je tiens à remercier particulièrement :

- Monsieur Yves DAVID, Directeur du CRESTA, qui m'a accordé toute sa confiance en me confiant cette tâche.
- Monsieur Philippe PREVOT, Ingénieur-Chercheur au CRESTA, qui m'a guidé avec la compétence et le dynamisme qui le caractérisent, tout au long de la rédaction de ce rapport.

Tous mes remerciements également à Madame ROUSSEL qui a bien voulu en assurer la frappe, et à Monsieur HYPACE.

INTRODUCTION

Environ soixante-cinq villes, de par le monde, possèdent aujourd'hui un ou plusieurs réseaux de métro dont la technologie est, en général, issue des principes classiques également appliqués aux réseaux de chemins de fer.

Parallèlement à ces transports en commun typiquement urbains, d'autres systèmes de transport, de moindre capacité, s'intègrent avec succès dans certains sites privés de grande superficie : aéroports, campus universitaires, ou parcs d'attractions.

Dès la fin des années soixante, de nombreux chercheurs se sont intéressés à des systèmes de transport fonctionnant de manière automatique, et ceci pour plusieurs raisons :

- pour réduire les coûts d'exploitation (coûts liés au personnel, en particulier),
- pour améliorer la qualité du service offert : vitesse commerciale et fréquence de passage plus élevée,
- pour ne plus être dépendants de certaines sources d'énergie,
- pour diminuer les frais d'infrastructures, grâce à l'utilisation de véhicules à gabarit plus réduit.

L'évolution de ces recherches est bien entendu liée à l'évolution, plus générale, des techniques de pointe : en particulier, l'utilisation, dès le début des années 80, du microprocesseur a marqué un pas décisif dans la conception du contrôle des trains.

.../

Nous avons parlé de "systèmes de transport automatique". De quoi s'agit-il exactement ?

Tout d'abord, convenons qu'un système de transport automatique est nécessairement en site propre. En effet, dans l'état actuel des recherches, on peut difficilement concevoir un système de transport automatique en site semi-protégé ou banalisé, où la voie peut être empruntée ou croisée par d'autres modes de transport. Ceci, essentiellement, pour des raisons de sécurité.

Distinguons ensuite :

- les systèmes à automatisme intégral qui fonctionnent (sauf circonstances exceptionnelles) sans conducteur à bord,
- les systèmes à automatisme non intégral, où il y a en permanence un conducteur à bord, le rôle de ce dernier étant d'effectuer quelques tâches simples (souvent : ordre de fermeture des portes, et ordre de départ de la station).

Dans ce document, nous nous intéresserons plus particulièrement à la première de ces catégories, en considérant les autres systèmes comme des étapes avant cet aboutissement technologique qu'est l'automatisme intégral.

Remarquons toutefois que cette distinction peut être parfois quelque peu floue : en effet, dans certains systèmes (au Japon en particulier), le conducteur à bord n'a absolument aucun rôle, il ne sert qu'à rassurer les voyageurs qui, paraît-il, conçoivent mal qu'ils puissent être totalement en sécurité dans une rame sans conducteur.

Si l'on s'intéresse plus à leur domaine d'utilisation, tous ces systèmes peuvent encore être regroupés en deux grandes catégories :

- les systèmes en site privé (aéroports, universités, parcs d'attractions, hôpitaux, centres commerciaux),
- les systèmes de transport public urbain.

Pour les systèmes en site privé, nous n'aborderons que ceux qui fonctionnent en automatisme intégral.

Pour les systèmes de transport en milieu urbain, outre les systèmes à automatisme intégral, nous examinerons également certains systèmes intéressants à automatisme non intégral, en particulier lorsque ces automatismes sont installés "après-coup" sur des réseaux métropolitains déjà existants.

Malgré ces restrictions, on voit que le domaine étudié est particulièrement vaste : il n'y a en effet pas grand rapport, a priori, entre une navette fonctionnant sur une ligne de 600m avec des cabines de 10 personnes, et le réseau métropolitain de Paris ! Toutefois, certaines fonctions liées aux automatismes peuvent être effectuées de manière très similaire.

Le but de ce rapport n'est pas d'examiner, un par un, chacun des systèmes de transport automatique en service ou en construction dans le monde. Cela a déjà été fait, d'ailleurs, dans d'excellents documents.

Nous nous intéresserons plutôt à certaines fonctions essentielles liées au PILOTAGE AUTOMATIQUE et à la manière dont la SECURITE est assurée. Nous examinerons alors comment ces fonctions sont effectuées en prenant soin, par souci de clarté, de distinguer, autant qu'il est possible, des "grandes familles".

LES DIFFERENTS SYSTEMES EN EXPLOITATION OU EN CONSTRUCTION

DANS LE MONDE

Nous avons cherché à constituer des grandes familles en séparant les systèmes suivant un premier critère lié à la manière dont est réalisée la protection, soit par des cantons fixes, soit par des cantons mobiles déformables, puis en les séparant de nouveau suivant un second critère lié au principe du pilotage automatique, c'est-à-dire la manière dont est réalisé le programme de vitesse :

pour les cantons fixes (. soit par envoi, pour chaque canton, d'une
(consigne de vitesse codée vers le véhicule
(. soit par l'inscription d'un programme de
(vitesse sur la voie ("tapis pilote").

pour les cantons mobiles déformables : nous avons distingué les systèmes où l'espacement des trains est défini par mesure d'une quantité électrique (potentiel ou courant alternatif) et les autres systèmes où l'espacement est réalisé par une connaissance des distances relatives entre trains. Dans ces systèmes la vitesse est alors calculée, en général, à bord du train, à partir des informations qu'il recueille sur la distance le séparant du train précédent.

Enfin, en marge de tous ces systèmes, les systèmes "à véhicule passif" constituent une catégorie particulière puisque tous les éléments (y compris propulsion) se trouvent, non pas à bord, mais sur la voie.

Le nom des différents systèmes, celui de leur constructeur et le(s) lieu(x) où le système est implanté sont consignés dans le tableau ci-après.

P R E S E N T A T I O N G E N E R A L E D E S S Y S T E M E S

Nous distinguerons :

- . les systèmes urbains à automatisme intégral
- . Les systèmes en site privé à automatisme intégral
- . les systèmes non encore exploités à vocation d'automatisme intégral
- . les métros lourds à pilotage automatique non intégral.

LES SYSTEMES URBAINS A AUTOMATISME INTEGRAL

Trois systèmes sont aujourd'hui en exploitation commerciale :

- . le "NEW TRAM" d'OSAKA, développé sous licence Vought sur une voie double de 6,9km et 8 stations. Ce système, mis en service dès 1981, est pour le moment exploité avec un agent à bord, mais cet agent n'a absolument aucun rôle.
- . la "PORTLINER" de KOBE, développée par Kawazaki sur une voie double (sauf une boucle qui est en voie simple) de 6,4km et 9 stations. Le système de Kobé fonctionne depuis 1983, sans conducteur à bord.
- . le VAL de LILLE, développé par Matra et mis en service en 1983 sur une ligne double de 12,7km et 17 stations. Ce système est le premier système à vocation pleinement urbaine, à fonctionner en automatisme intégral sans personnel à bord.

Deux autres systèmes de grande capacité sont en construction :

- . le système de la firme canadienne UTDC, utilisant le pilotage automatique allemand SELTRAC, qui va prochainement être installé à Vancouver et Detroit (*) et, en automatisme intégral, à Toronto;
- et . le système de WESTINGHOUSE à Miami qui est en passe de devenir le premier système urbain à automatisme intégral aux Etats-Unis. (Comme nous le verrons plus loin, Westinghouse a déjà une grande expérience des systèmes à automatisme intégral).

(*) Ce seront les premiers systèmes au monde où la sécurité est entièrement assurée par ordinateur.

Citons enfin deux systèmes à véhicules passifs tractés par câble : le système POMA 2000 , prochainement exploité en France dans la ville de Laon pour relier la ville haute à la ville basse; et le système OTIS, installé à Tampa (centre ville) qui est une navette sur coussin d'air, fonctionnant en "ascenseur horizontal". (la voie est unique avec "by-pass" au milieu, comme la navette de Fairlane).

LES SYSTEMES EN SITE PRIVE A AUTOMATISME INTEGRAL

Le premier de ces systèmes à avoir fonctionné a été le JETRAIL, à l'aéroport de Lovefield de Dallas, dès 1970. Ce système comprenait 10 véhicules suspendus à un monorail sur une voie double de 1,2km avec 3 stations. Lors du déménagement de l'aéroport de Dallas à Forth Worth, en 1974, l'exploitation du Jetrail a été stoppée et, dans le nouvel aéroport, la firme Vought a développé le système AIRTRANS (qui est le premier système automatique de grande capacité à avoir été exploité) sur 20 Km de voie simple et 53 stations.

La société WESTINGHOUSE a développé de nombreux systèmes, surtout dans les aéroports : Tampa Airport en 1971, puis Seattle-Tacoma Airport, la navette de Busch Gardens (parc d'attractions), Miami Airport, Atlanta Airport, Orlando Airport et enfin Gatwick Airport, en 1983.

Nous nous intéresserons plus particulièrement au système d'Atlanta Airport (qui est le plus complexe), en précisant les différences éventuelles avec les autres systèmes. Ce système, mis en service en 1980, relie le terminal à quatre halls d'embarquement par une voie de 1,6 km et 5 stations.

Des parcs d'attractions comme celui de King's Dominion ou le zoo du Minnesota sont équipés de petits systèmes développés par la compagnie UNIVERSAL MOBILITY Inc. (U.M.I.), alors que Disney World a développé lui-même son propre système, baptisé WEDWAY (mis en service en 1975 dans le Disney World de Floride) et qui équipe également l'aéroport de Houston depuis 1981.

D'autres systèmes retiendront aussi notre attention :

Le système de MORGANTOWN, développé par BOEING et mis en service en 1975 (5,4 km de voie double et 5 stations); le C-BAHN allemand, exploité pour le moment en "ascenseur horizontal" à l'hôpital de Ziegenhain, mais qui devrait connaître dans un futur proche des applications plus larges,

le H-BAHN de l'Université de Dortmund qui est le premier système à automatisme intégral mis en service en Allemagne (en 1984) sur une voie unique de 1 300 m; le MAGLEV anglais, à sustentation magnétique, fonctionnant en navette (ligne de 620 m) à l'aéroport de Birmingham.

Citons enfin le système OTIS, en service à l'Université de Duke et la navette de FAIRLANE, mise au point par FORD, sur une ligne de 800 m.

LES SYSTEMES NON ENCORE EXPLOITES A VOCATION D'AUTOMATISME INTEGRAL

Dans ce paragraphe, nous aborderons les systèmes qui sont encore sur site d'essais et dont une future exploitation commerciale n'est pas encore contractuellement prévue.

Au Japon, le système V.O.N.A. (Véhicule of New Age) équipe depuis 1983 la "Yukarigaoka Line" mais sans automatisme intégral. Il faut attendre 1988 pour voir V.O.N.A. en automatisme intégral sur la "Tokadai Line" (environs de Nagoya, 7,4 km de voie double, 7 stations). Un autre système est en développement au Japon : C.T.M., particulièrement innovateur puisque les véhicules sont propulsés par des courroies magnétiques au sol.

En Allemagne est développé le M-BAHN, véhicule à sustentation magnétique.

En France, Matra a mis au point "ARAMIS" (Arrangement en Rames Automatisées de Modules Indépendants en Station) qui utilise un concept fort original.

En Belgique, enfin, le système TAU (Transport Automatique Urbain) est expérimenté et pourrait être installé à Liège dans les prochaines années.

LES METROS LOURDS A PILOTAGE AUTOMATIQUE NON INTEGRAL

. Aux Etats-Unis, le B.A.R.T. de San Francisco (développé par Westinghouse) dont les dérivés sont les métros de Sao Paulo, Washington, Atlanta et Baltimore.

. En Allemagne : le S-BAHN de Munich

. En France : les métros de PARIS, LYON et MARSEILLE

. En Grande Bretagne : la "Victoria Line" du METRO DE LONDRES ainsi que de nombreux autres métros auxquels nous ne nous intéresserons pas ici.

LES PRINCIPALES FONCTIONS
DE PILOTAGE AUTOMATIQUE ET DE SECURITE

LA DETECTION DE PRESENCE DES TRAINS

Nous nous contenterons dans ce paragraphe de citer les principaux moyens de réaliser la fonction "détection de présence". Ces moyens seront explicités dans le paragraphe suivant : "Sécurité anti-collision".

1) Les systèmes à détection ponctuelle

- . Morgantown : détecteurs ponctuels
- . Disney World (WEDWAY) : détecteur magnétique
- . M-BAHN : activateurs
- . POMA 2000 : roue optique et balises
- . V.O.N.A. : antennes embarquées et balises

2) Les systèmes à détection par contact de frotteurs sur un "rail de signalisation"

- . UMI (King's Dominion)
- . Westinghouse (Atlanta Airp^t)
- . Airtrans
- . Fairlane

3) Les systèmes à détection par des émissions (par des antennes embarquées) sur des boucles inductives au sol

- . UTDC
- . Aramis
- . VAL
- . S-BAHN
- . Westinghouse (Seatte-Tacoma, Tampa)
- . Kobé Portliner
- . Osaka New-Tram
- . Maglev de Birmingham
- . TAU

4) Les systèmes de détection par circuits de voie

- . Métros de Paris, Lyon, Marseille, Londres, San Francisco
- . CTM (Sorte de circuits de voie), Jetrail

5) Les systèmes à détection par émission d'un signal alternatif sur la voie

- . C-BAHN

LA SECURITE ANTI-COLLISION

Le dispositif de sécurité anti-collision a pour rôle d'assurer, à chaque instant, un espacement suffisant entre les trains afin que, même si un incident se produit dans un train, dans les équipements de voie ou au contrôle central, deux trains n'entrent pas en collision. Ce dispositif est toujours décentralisé, c'est-à-dire indépendant de l'ordinateur central.

Rappelons le principe du fonctionnement en sécurité d'un système : Tout cas de panne ou incident dans le dispositif de sécurité met le système dans l'état de plus faible énergie. Dans le cas qui nous intéresse ici (système de transport guidé), cet état est le FREINAGE D'URGENCE.

On comprend, enfin, que la fonction de sécurité anti-collision est prédominante puisque la sécurité est toujours la condition "sine qua non" pour que les trains aient l'autorisation de rouler.

Nous reprendrons essentiellement la distinction faite dans le tableau et le paragraphe de présentation, à savoir :

- . systèmes à cantons fixes
- . systèmes à cantons mobiles déformables
- . systèmes à véhicule passif.

.../

I - SYSTEMES A CANTONS FIXES AVEC UNE CONSIGNE DE VITESSE PAR CANTON

Parmi tous les systèmes que nous étudierons, ces systèmes constituent le groupe le plus important.

Bien sûr, ils fonctionnent tous en sécurité, c'est-à-dire que si le train ne reçoit aucune consigne de vitesse, il y a automatiquement freinage d'urgence.

D'une manière générale, la voie est divisée en cantons fixes et sur chaque canton le train reçoit, par l'intermédiaire de la voie, une consigne de vitesse dépendant de la configuration topographique de la voie, mais aussi de la position des autres trains sur la voie de manière à éviter, même en cas de freinage d'urgence de l'un des trains, une collision entre trains.

1) Les systèmes à détection ponctuelle

Nous trouvons 2 systèmes dans cette catégorie : le système BOEING de Morgantown, et le système V.O.N.A. Japonais.

Dans les deux cas, la sécurité anti-collision est effectuée par l'intermédiaire d'un "canton tampon" (c'est-à-dire qu'il doit toujours y avoir au moins un canton entier libre entre deux trains, sinon le freinage d'urgence est actionné dans le train amont).

. Dans le système BOEING de Morgantown, la détection des véhicules est faite par des détecteurs ponctuels de présence placés sur la voie. La ligne est divisée en cantons (de longueur très variable : entre 1m et 80m, suivant la configuration de la voie), et des détecteurs de présence (indépendants des précédents) contrôlent l'occupation des cantons.

Sur la voie, des boucles transmettent à tout instant au véhicule une "autorisation de rouler" par envoi d'un signal fréquentiel : un signal positif (porteuse 10,2 KHz modulée à 50 Hz par des antennes) indique au train que le canton est libre (si le signal positif n'est pas reçu, il y a freinage d'urgence).

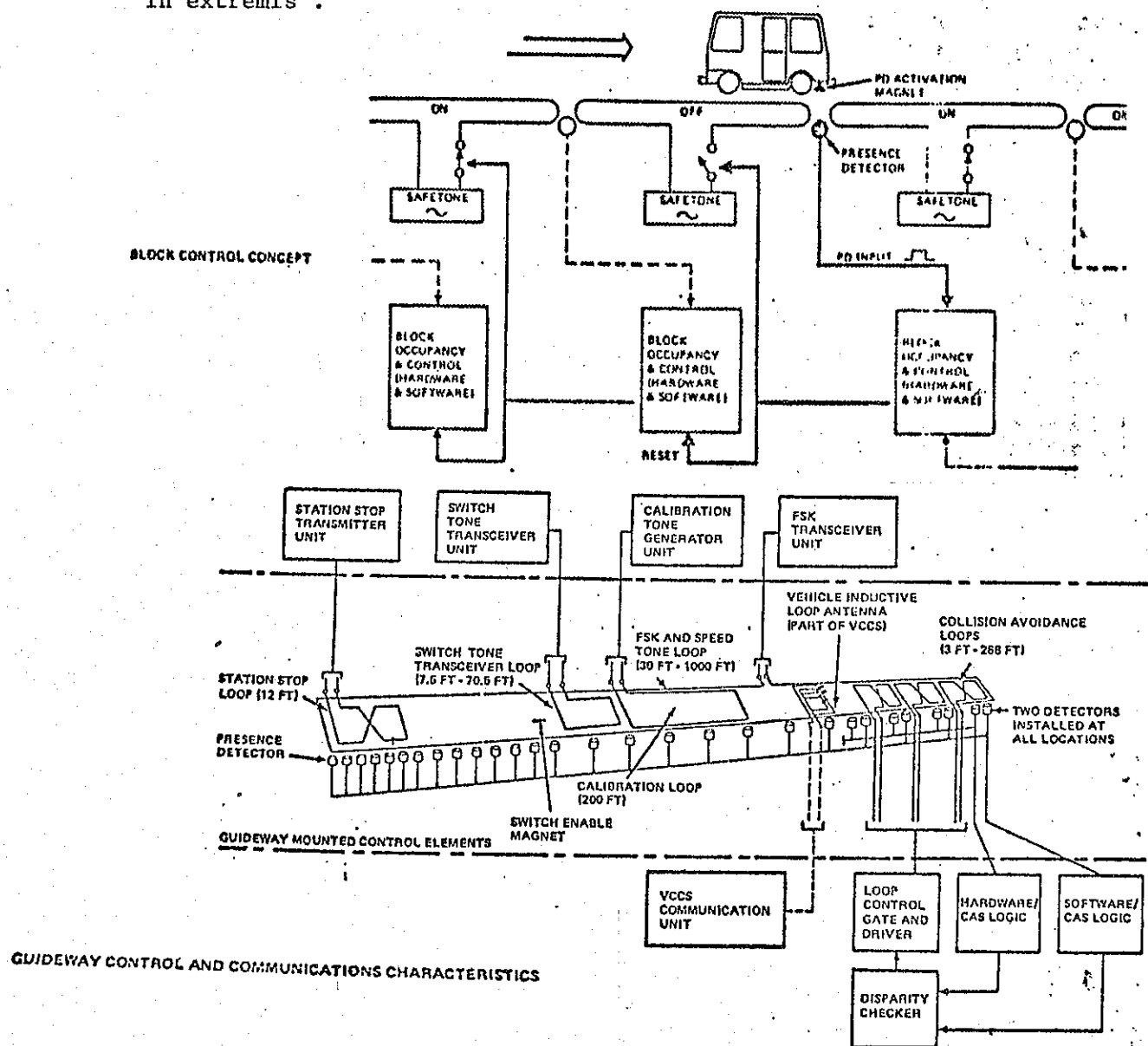
.../

Indépendamment du cantonnement anti-collision, des boucles de consigne de vitesse (ponctuelles) sont placées à l'entrée de certaines zones.

Les consignes de vitesse, outre les consignes de freinage, sont 24, 36 ou 48 km/h suivant la configuration de la voie.

Un changement de fréquence d'une boucle à l'autre signifiant donc un changement de consigne de vitesse entraîne un changement de vitesse avec une accélération (ou décélération) limitée pour respecter le confort des passagers.

Le système anti-collision est redondant, il utilise deux logiques indépendantes. Il faut noter qu'il est indépendant du système de consigne de vitesse. C'est donc, en quelque sorte, un système fonctionnant "in extremis".



. Dans le système Japonais V.O.N.A. (la "Yukarigaoka Line"), la détection des véhicules se fait par l'intermédiaire de balises, qui sont des boucles de 2 mètres de longueur disposées verticalement le long de la voie.

La ligne est divisée en 4 cantons. (La présence d'un canton tampon impose donc, d'ailleurs, qu'il ne peut y avoir plus de deux véhicules en même temps sur la voie).

Ces balises détectent l'entrée et la sortie des cantons : les véhicules émettent un signal (105 KHz) par l'intermédiaire d'antennes embarquées. Dès réception de ce signal sur une balise d'entrée, une logique à relais de sécurité déclare l'occupation du canton. Par sécurité quand le train arrive en limite de canton, une balise commune déclare simultanément l'occupation du canton aval et la levée de l'occupation du canton amont.

Rappelons que, pour le moment, le système V.O.N.A. ne fonctionne pas en automatisme intégral et qu'il n'y a pas de signalisation en cabine. Le conducteur est donc informé de l'état d'occupation des cantons par une signalisation latérale (feux).

En cas de franchissement d'un feu rouge, des balises spéciales (balises "d'arrêt absolu") émettant vers les antennes de bord un signal (130 KHz), provoqueront l'arrêt immédiat du véhicule.

2) Les systèmes à détection par contact de frotteurs sur un "rail de signalisation"

Dans ces systèmes, la communication entre le véhicule et les équipements de voie est effectuée par l'intermédiaire d'un rail spécial, appelé fréquemment "rail de signalisation". Le principe est celui du "circuit de voie", mais ici, ce ne sont pas les rails de roulement qui supportent le transfert d'informations.

.../

Dans ce paragraphe, nous trouverons les systèmes :

- Westinghouse (Atlanta),
- Airtrans
- Fairlane.

. A l'aéroport d'Atlanta (système Westinghouse), la voie simple de 3,6 km est divisée en 82 cantons par des joints d'isolation. La détection des trains se fait par 2 des 5 rails (les 3 autres rails servant à l'alimentation de la ligne en courant triphasé) : ce sont les rails de signalisation.

Quand un train occupe un canton, il shunte le circuit de voie ainsi formé (il y a en fait 2 shunts redondants, par sécurité). Une consigne de vitesse raisonnable est alors transmise au véhicule par les équipements de voie (porteuse de 5 à 10 KHz, modulée à 18 Hz). Cette consigne de vitesse, codée sur 6 bits, peut prendre 8 valeurs discrètes (frein d'urgence, redémarrage, changement de direction, 0 km/h, 8 km/h, 19 km/h, 29 km/h, 43 km/h). Le décodage de la consigne est fait en sécurité par la logique embarquée (2 microprocesseurs redondants).

. Comme le système Westinghouse, le système AIRTRANS (aéroport de Dallas) utilise, outre les 3 rails de courant, 2 "rails de signalisation". Le système est un système de cantons fixes, formés en isolant des sections de l'un des rails, le second étant à la terre. Il y a 708 cantons, de longueur moyenne 27m (de 14m dans les zones à basse vitesse, à 73m). La communication véhicule-voie se fait par contact de deux frotteurs sur les 2 rails de "signalisation". Cinq fois par seconde, la logique embarquée transmet aux équipements de voie toutes les informations concernant l'état et l'itinéraire du véhicule, tandis que ces derniers transmettent au véhicule une consigne de vitesse raisonnable, élaborée suivant la méthode suivante, que nous pouvons appeler "méthode des cinq cantons" : le canton amont est "canton tampon", sa pénétration entraîne le freinage d'urgence. Sur le canton suivant, la consigne est "Stop" (0 km/h). Sur les deux cantons suivants, la consigne est : 15 km/h (ralentissement). Deux trains peuvent donc suivre leur vitesse de croisière normale (27 km/h) s'ils sont séparés par au moins cinq cantons (en comptant le canton occupé par le train aval), c'est-à-dire quatre cantons vides.

. Le cas du système de FAIRLANE est un peu particulier : il s'agit d'une navette sur voie simple, sauf au milieu où la voie est dédoublée pour permettre le croisement des deux véhicules.

La ligne est divisée en 14 cantons (dont 2 x 3 cantons, au milieu). Les véhicules sont détectés par contact de frotteurs sur le "rail de signalisation" (c'est-à-dire par shunt). Les consignes de vitesse sont élaborées par les relais de voie, après consultation des informations reçues sur tous les cantons.

A travers le rail de signalisation, la communication voie \rightarrow véhicule se fait par des commandes, qui sont des combinaisons linéaires de cinq fréquences de base (f1, f2, f3, f4, f5), la réponse véhicule \rightarrow voie étant alors assurée par combinaison linéaire de cinq fréquences "écho" (f6, f7, f8, f9, f10) .

Evidemment, le dispositif anti-collision ne concerne que la zone du milieu. Les deux véhicules doivent arriver en même temps (chacun d'un côté) sur la zone où la voie est dédoublée pour repartir ensuite sur les tronçons à voie unique. Disons simplement que ce dispositif fonctionne comme une "table de vérité" : la table de vérité contient les informations relatives à une bonne synchronisation des véhicules : les cantons sur lesquels ils doivent entrer, à quel instant, avec quelle vitesse, etc....

Si l'approche n'est pas synchronisée, la "table de vérité" est fausse et les calculateurs de bord synchronisent l'approche (ils sont, en particulier, obligés de ralentir les véhicules).

Il se peut (mais c'est extrêmement rare) qu'il y ait un problème dans la bonne marche de ce dispositif ; dans ce cas, le freinage d'urgence est immédiatement actionné.

Notons enfin que la navette de FAIRLANE, conçue par FORD, utilise un système de contrôle très modulaire, c'est-à-dire qu'il pourrait être adapté sur d'autres réseaux plus complexes.

.../

3) Les systèmes à circuits de voie

Contrairement au paragraphe précédent, nous parlons ici ouvertement de circuits de voie (même si JETRAIL n'utilise pas des circuits de voie classiques utilisés sur les réseaux de voie ferrée), parce que la détection se fait par les rails de roulement.

Dans ce paragraphe, nous rencontrerons, bien sûr, les métros de Lyon, Marseille, Londres, mais aussi le B.A.R.T. de San Francisco et un autre système : le JETRAIL.

. Le métro de LYON, mis au point par la firme ALSTHOM-ATLANTIQUE, utilise un système de cantons fixes à circuit de voie sans joints isolants (comme le métro de PARIS). Le support des transmissions consiste en une ligne bifilaire, appelée ligne "B 3", posée sur la voie qui comporte des croisements à pas fixe en interstation, et des croisements à pas variable en station (et aux abords des stations). La sécurité anti-collision est commandée (sans relais) par les récepteurs de circuit de voie.

Sur chaque canton (il y a au moins une boucle B 3 par canton), une vitesse limite est transmise aux trains, cette vitesse dépendant comme toujours de la configuration de la voie et des conditions d'occupation des autres cantons et des stations. Plus précisément, chaque boucle B 3, alimentée par les équipements de station, émet deux fréquences simultanées caractérisant la consigne de vitesse : 7 vitesses discrètes ou 3 ordres d'arrêt différents.

L'exploitation se fait sans canton tampon : lorsqu'un canton est occupé, le signal de consigne de vitesse n'est coupé que sur une zone de 20m en amont de ce canton (par l'intermédiaire d'une boucle courte).

.../

. Le métro de MARSEILLE, développé par JEUMONT-SCHNEIDER (comme le métro de MONTREAL), utilise des cantons fixes avec des circuits de voie "à impulsion de tension élevée", qui offrent une grande sécurité de shuntage puisque les courants de court-circuit atteignent 100 A. La seule transmission par les rails (par les circuits de voie) permet d'assurer toutes les fonctions de sécurité.

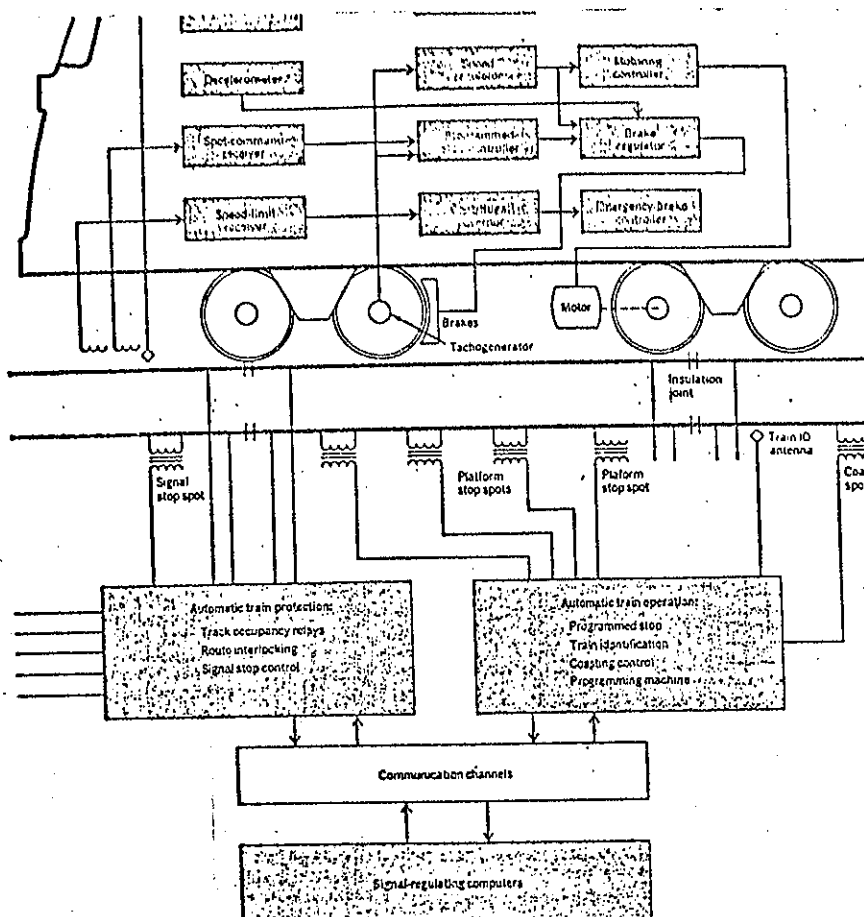
La détection de présence est réalisée de la manière suivante :
A l'extrémité aval de chaque canton, se trouve un émetteur d'impulsions commandé et contrôlé par un boîtier pilote. A l'extrémité amont, se trouve un récepteur avec son relais de voie. Ces impulsions, à des périodes de récurrence différentes, permettent aussi le transfert d'informations concernant la consigne de vitesse. La sécurité anti-collision est assurée par le calcul, à bord et en sécurité, de la vitesse limite, par l'intermédiaire des boîtiers de captation.

. L'automatisation de la "VICTORIA LINE" du métro de LONDRES permet une exploitation sans canton-tampon.

Le principe est celui des cantons fixes à circuits de voie avec joints d'isolation. La détection des trains se fait donc directement par les rails. La transmission de la consigne de vitesse se fait par l'envoi d'une fréquence de 125 Hz, d'amplitude modulée à 2, 3, 4, 5 ou 7 Hz. Le dispositif anti-collision utilise la notion d'"overlap" (distance de chevauchement) qui est la distance minimum de freinage d'urgence, calculée dans les conditions les plus défavorables (vitesse maximum,....., une marge est aussi rajoutée par sécurité).

Le principe du dispositif anti-collision est le suivant :
derrière chaque train, une "zone morte", de longueur égale à l'"overlap", est maintenue en coupant tout signal sur cette zone. Si un autre train pénètre cette zone, il ne reçoit plus aucun signal (fréquence correspondant à une consigne de vitesse), ce qui déclenche le freinage d'urgence.

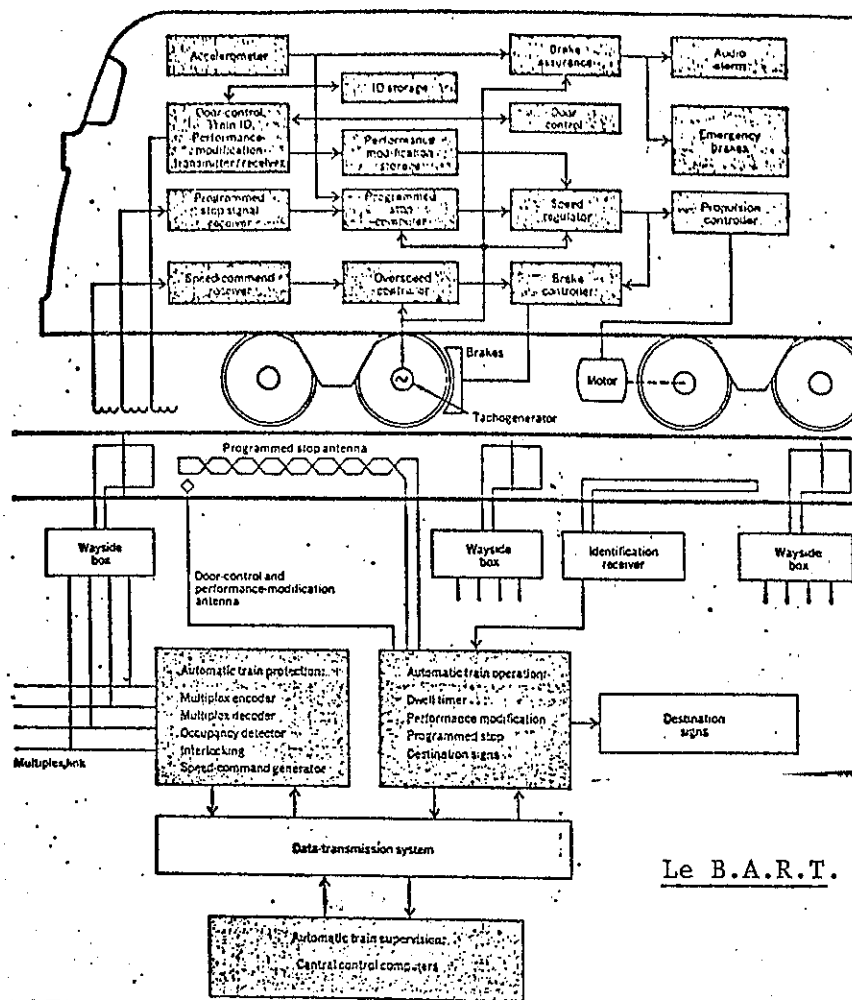
.../



LE METRO DE LONDRES

. Le B.A.R.T. (Bay Area Rapid Transit) de San Francisco (desserte urbaine), qui utilise le pilotage automatique WESTINGHOUSE, utilise un dispositif de protection très similaire au système Westinghouse de l'aéroport d'Atlanta, sauf que la communication passe par les rails de roulement (il n'y a pas de "rails de signalisation" supplémentaire). Le B.A.R.T. utilise des circuits de voie avec joints d'isolation. Les consignes de vitesse, codées (8 consignes possibles) sont transmises au train par des signaux dans la bande 5 KHz - 10 KHz.

Le B.A.R.T. ayant connu certains déboires à ses débuts (un grave accident, qui a d'ailleurs beaucoup discrédité les transports automatiques dans le monde entier), la détection de présence est maintenant effectuée de manière séquentielle : un canton n'est déclaré libéré que quand le canton suivant a été déclaré occupé.



Les trois systèmes précédents (métros de LYON, MARSEILLE et SAN FRANCISCO) fonctionnent avec un conducteur à bord.

Pour terminer ce paragraphe sur les systèmes à circuit de voie, quelques mots sur le système JETRAIL qui, même s'il n'est plus en fonctionnement depuis 1974, mérite qu'on le cite dans la mesure où il fut le premier système à automatisme intégral à fonctionner.

Le système JETRAIL, qui était installé à l'aéroport de Dallas Love Field, n'utilisait pas des circuits de voie classique, mais un système fort original : La ligne est divisée en 208 segments (cantons), de différentes longueurs (de 30 m en ligne droite d'interstation à 0,6m près des stations).

.../

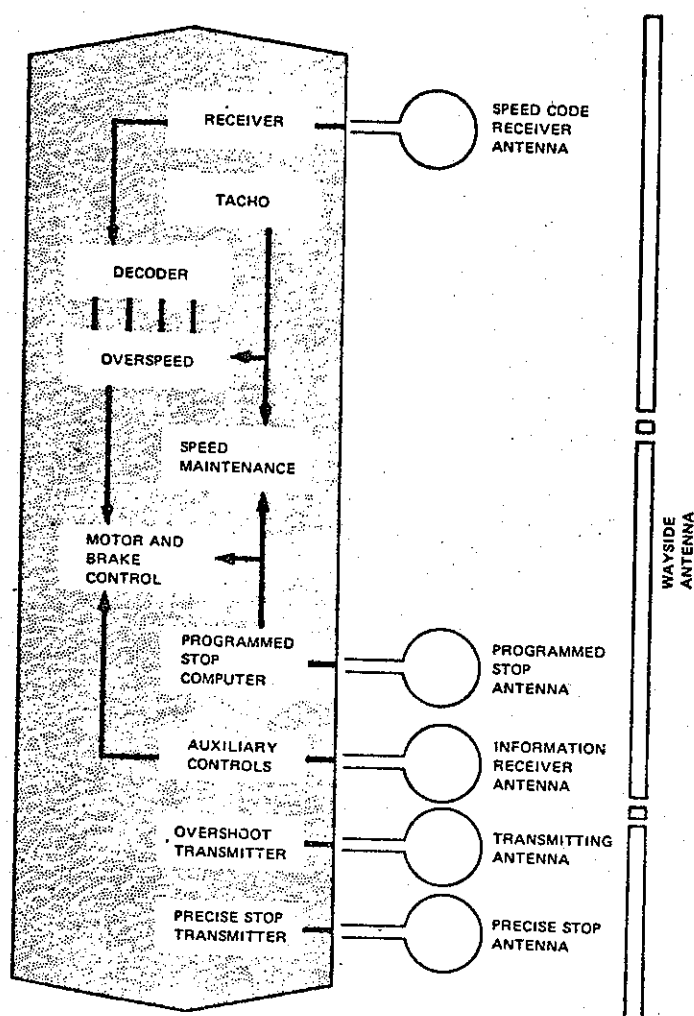
Chaque segment est porté à un potentiel proportionnel à la vitesse désirée (5 valeurs discrètes : 0 km/h ; 2,4 km/h ; 7,2 km/h ; 14,5 km/h ou 24 km/h). Ce potentiel est transmis en sécurité du Contrôle Central aux segments par un circuit "cascade en série". Ce système (un système de relais, en fait) fonctionne en redondance.

La fonction anti-collision est réalisée en créant, derrière chaque véhicule, une zone de 4 segments où les vitesses sont limitées :
le premier segment a pour consigne de vitesse : 0 km/h (Stop), le second a pour consigne : 2,4 km/h, le troisième : 7,2 km/h, et le quatrième : 14,5 km/h.

4) Systèmes à détection par réception d'émissions provenant du train par des antennes placées le long de la voie

C'est le cas des systèmes Westinghouse de Seattle-Tacoma Airport et de Tampa Airport, mais aussi de la "Portliner" de Kobé et du New-Tram d'Osaka.

. Le système de Tampa Airport n'est pas très intéressant ici car il s'agit d'une navette (une collision est évidemment impossible). Dans le système de Seattle-Tacoma Airport, la voie est divisée en cantons (dont la longueur varie de 35m à 285m). Les consignes de vitesse sont stockées dans les équipements de voie et transmises au véhicule par une antenne longitudinale ; cette consigne est reçue par une antenne de bord. La protection anti-collision est effectuée en ajustant les consignes de vitesse de manière à ce qu'il y ait toujours un canton libre entre 2 trains. C'est le système classique du canton tampon : 1 canton (canton tampon) dont la pénétration provoque le freinage d'urgence, et un canton dont la pénétration provoque le freinage de service (vitesse de consigne nulle).

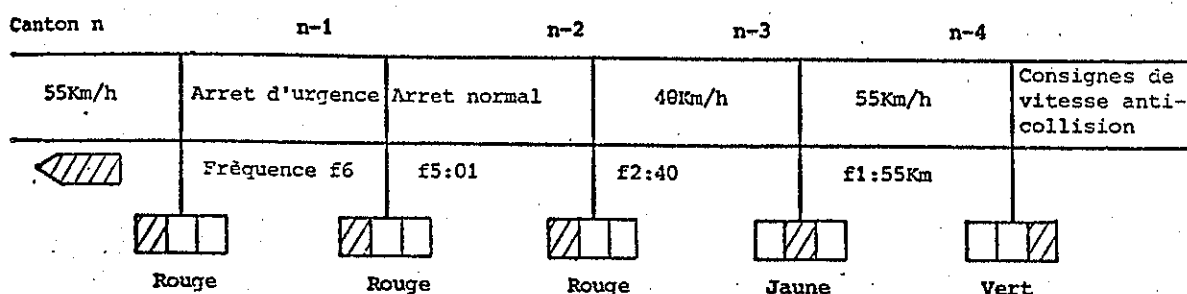


VEHICLE CONTROL BLOCK DIAGRAM — TAMPA PASSENGER SHUTTLE SYSTEM & SEATTLE-TACOMA AGT

.../

. Les systèmes de KOBE et OSAKA sont très similaires. La détection de présence s'effectue grâce à des boucles inductives au sol et deux antennes émettrices embarquées travaillant sur deux fréquences différentes : chacune des deux antennes de bord émet une haute fréquence sur les boucles. Une fréquence, correspondant à une consigne de vitesse est alors renvoyée au train : il y a 6 fréquences possibles pour OSAKA (arrêt d'urgence, 0 km/h, 10 km/h, 25 km/h, 40 km/h, 55 km/h) et 7 pour KOBE (arrêt d'urgence, 0 km/h, 5 km/h, 15 km/h, 30 km/h, 40 km/h, 60 km/h).

Le dispositif anti-collision est bien sûr basé sur le découpage de la ligne en cantons, la logique de canton étant assuré par les relais de sécurité avec utilisation d'un "canton-tampon".



SYSTEME d'OSAKA

II - SYSTEMES A CANTONS FIXES AVEC PROGRAMME DE VITESSE INSCRIT SUR LA VOIE

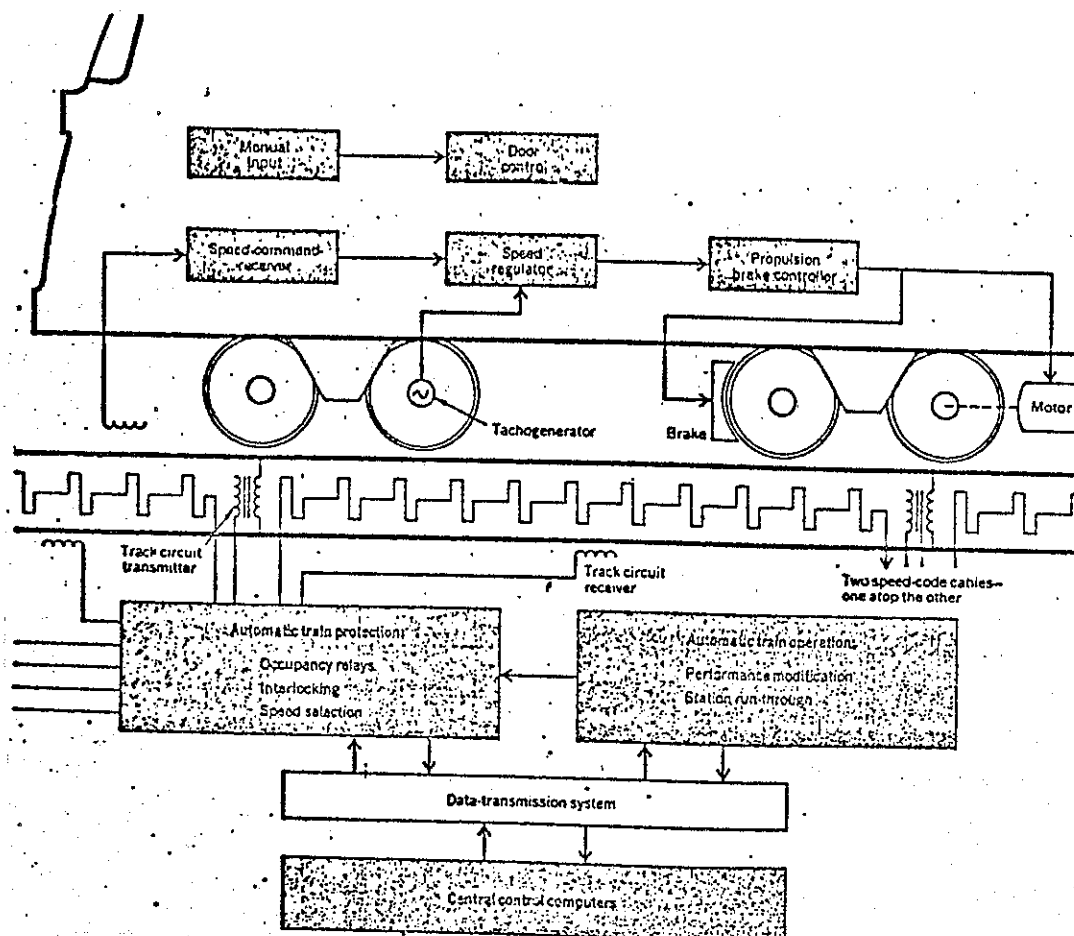
C'est le cas du VAL de LILLE, qui constitue une évolution appréciable des technologies employées depuis longtemps pour le métro de PARIS.

Parlons brièvement du métro de PARIS et ses dérivés : les métros de RIO, MEXICO, SANTIAGO, CARACAS. La détection de présence s'effectue par des circuits de voie classiques, sans joints d'isolation, qui découpent la ligne en cantons fixes. Un programme disposé sur la voie matérialise en chaque point la vitesse à atteindre. Plus précisément, il y a deux programmes : un programme "vert" correspondant au mode normal, et un programme "rouge" correspondant au mode perturbé, c'est-à-dire quand le canton suivant est occupé (sauf en station où il n'y a qu'un programme d'arrêt en station).

.../

Les trains sont équipés de deux capteurs qui, passant sur les appareils de voie, détectent les discontinuités de programme et, après décodage, en déduisent une vitesse de consigne. Les fréquences utilisées se situent dans la bande 8,2 - 12,3 KHz. La sécurité anti-collision est basée sur le principe du canton tampon ; toutefois, les derniers systèmes élaborés, comme le métro de RIO, autorisent un fonctionnement sans canton tampon.

METRO de PARIS



.../

. La voie du métro de LILLE (VAL) est découpée en cantons, qui sont regroupés en tronçons autonomes (la ligne n° 1 est ainsi divisée en 10 tronçons).

La détection d'occupation des cantons est effectuée au sol par la "logique de canton". Elle consiste en :

- . Un contrôle séquentiel d'entrée et de sortie des tronçons grâce aux "boucles de détection positive" et aux détecteurs négatifs. Ceci permettra de s'assurer qu'un véhicule pénétrant sur un tronçon a des antennes anti-collision fonctionnant correctement (le principe de la détection négative est l'occultation d'un faisceau d'ondes ultra sonores, au passage d'un train).
- . Un suivi séquentiel de la progression des trains sur les différents cantons du tronçon grâce à une détection positive utilisant les signaux anti-collision émis de façon continue par les rames. (La réception est effectuée par des antennes disposées le long de la voie).

Les boucles de détection de présence (positive) sont au nombre de une par canton, auquel il faut ajouter une boucle courte en limite de canton ou de tronçon. Les détecteurs négatifs sont disposés en limite de chaque tronçon.

La consigne de vitesse est transmise aux rames par l'intermédiaire de deux boucles à croisements équitemps, sur chaque canton, correspondant à deux programmes de vitesse possibles : un programme normal (boucles "FS" : Fréquence de Sécurité), et un mode perturbé (boucles "PP" : Programme Perturbé, ce mode permet au train de s'arrêter à une distance de sécurité du canton aval occupé).

La logique de canton, via la logique de mode, transmet au train le régime à suivre : normal, perturbé, ou mode accostage (permettant de pénétrer un canton occupé par une rame en panne et de l'accoster à basse vitesse).

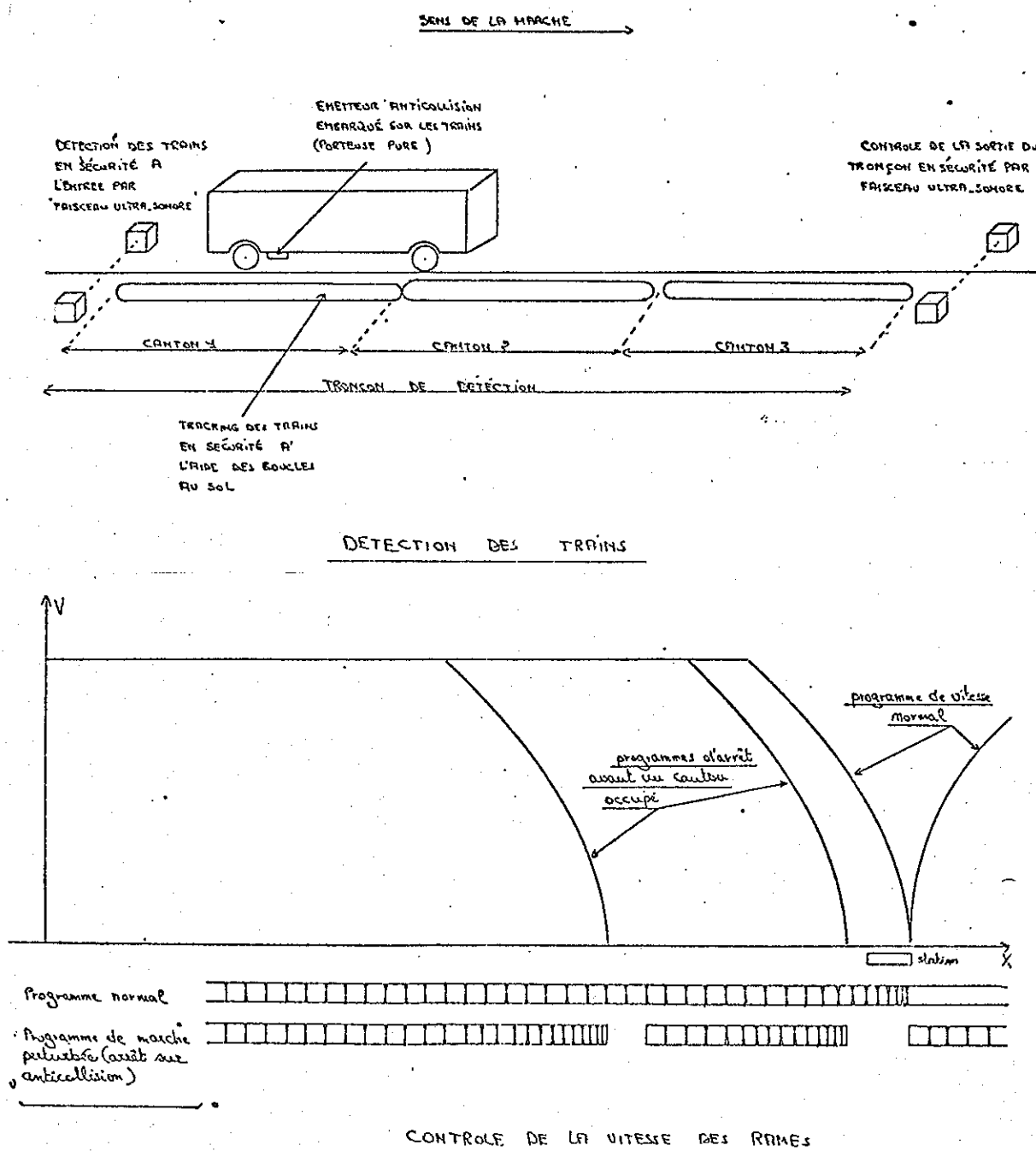
.../

Si la logique de canton détecte un fonctionnement anormal :

- ou { . une rame entrant dans un canton occupé
 ou . l'entrée d'une rame par la sortie d'un canton (contre-sens)
 ou . la disparition des émissions anti-collision d'une rame qui n'a pas quitté un canton

alors la fréquence de sécurité est coupée sur le tronçon, ce qui entraîne le freinage d'urgence. (Cela assure la sécurité anti-collision).

Dans le cas contraire, la porteuse (fréquence de sécurité) est transmise aux rames par les boucles "FS" ; cette porteuse indiquant "l'autorisation de rouler".



III - SYSTEMES A CANTONS MOBILES DEFORMABLES, LES CANTONS ETANT DEFINIS PAR MESURE DE POTENTIEL OU DE COURANT

Ces systèmes sont au nombre de deux : le système U.M.I. et le C-BAHN Allemand.

Comme nous allons le voir, ce sont des systèmes particulièrement originaux :

- Le système U.M.I. est installé depuis 1975 au parc d'attractions de King's Dominion (USA).

A bord des trains, un "Autopilote" effectue lui-même toutes les opérations de contrôle.

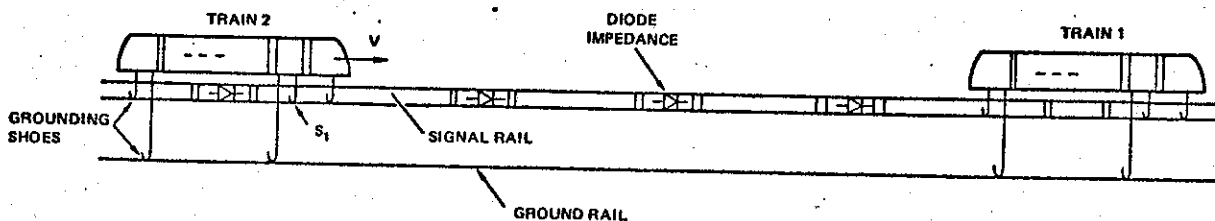
Le principe est le suivant : chaque train (équipé, à l'avant et à l'arrière, d'une paire de patins frotteurs), transmet en direction du train aval un signal de 28 V, 60 Hz sur un rail spécial, segmenté à l'aide de joints d'isolation, de diodes en pont (disposées en série), et d'impédances.

Les segments ont une longueur d'environ 9m.

Le train aval ayant un patin frotteur passif renvoyant le signal par un autre rail, la chute de potentiel est proportionnelle au nombre d'impédances entre ce train et le train qui le suit (train amont), donc à la distance entre les deux trains.

L'autopilote du train amont, connaissant la chute potentiel sur la voie ainsi que sa propre vitesse (par mesure tachymétrique), peut alors calculer la distance de freinage minimum pour assurer la sécurité anti-collision, et la respecter.

Remarquons que, grâce aux diodes, le signal ne passe que dans un seul sens. Ainsi, chaque train ne détecte que le train qui le précède, ce qui est suffisant.



UMI SIGNAL RAIL CONTACTS: KING'S DOMINION

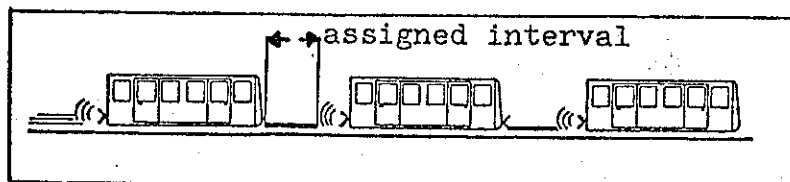
. Le C-BAHN Allemand n'est, pour l'instant, exploité qu'en "ascenseur horizontal" dans un hôpital.

Nous nous intéresserons plutôt ici au concept modulaire, plus général, du C-BAHN qui devrait permettre des applications très diverses.

Chaque véhicule, équipé de deux émetteurs/récepteurs de courant alternatif redondants, transmet en direction du véhicule amont ("derrière lui", donc) un signal alternatif qui s'amortit exponentiellement sur la résistance du câble. De plus, l'amplitude du signal envoyé est proportionnel à la vitesse du véhicule (calculée par 2 tachymètres redondants). Le véhicule amont compare alors sa distance de freinage minimum (dépendant, en particulier, de la différence entre sa vitesse et la vitesse du véhicule aval) à la distance réelle séparant les deux véhicules, calculée à partir de l'amplitude du signal reçu.

L'unité de contrôle de bord génère alors, en sécurité, une commande de propulsion permettant d'éviter toute collision.

Remarquons que l'amortissement du signal est calculé sur deux câbles différents, en redondance.



.../

IV - LES AUTRES SYSTEMES A CANTONS MOBILES DEFORMABLES

Tous ces systèmes utilisent le principe de la "boucle à croisements équidistants" , sauf le H-BAHN Allemand, système très particulier que l'on pourrait définir comme un "Système à mini-cantons glissants".

. Intéressons-nous tout d'abord au système de la compagnie canadienne UTDC, utilisant le système de pilotage automatique allemand SELTRAC.

La détection de présence se fait de manière continue par une boucle inductive (longueur : 1 ou 2 km) qui se croise tous les 25m. A chaque fois que le train passa sur un croisement, l'antenne embarquée détecte le changement de phase et en informe l'unité de contrôle à bord (appelée "VOBC"), qui calcule alors la position du train en l'affinant grâce aux mesures du tachymètre.

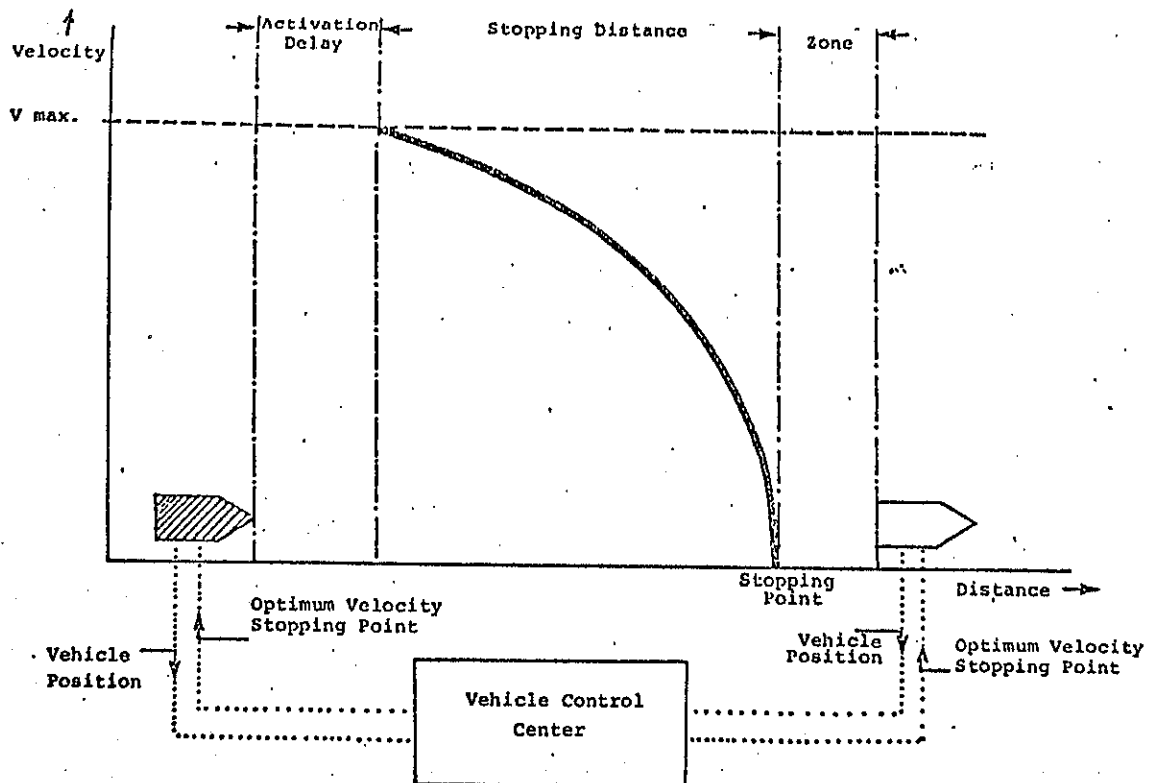
Le VOBC transmet ensuite aux équipements de contrôle sur la voie (appelés "VCC", chaque VCC contrôle une trentaine de kilomètres de voie unique) un message indiquant, entre autres, la position du train, sa vitesse et la direction du déplacement.

Le VCC reçoit de tels messages de tous les trains.

Compte tenu de la position relative des trains et des données topographiques de la voie (stations, pente, etc.....), le VCC renvoie alors à chaque train (VOBC) une réponse sous forme d'un nouveau message indiquant la vitesse maximum et le point-cible à ne pas dépasser. Cette vitesse est directement fonction de la distance de sécurité anti-collision (distance minimum de freinage + marge, le train aval étant considéré comme arrêté).

En cas de mauvais fonctionnement de la transmission sol \longleftrightarrow train, le point-cible n'est pas modifié, ce qui est bien sécuritaire.

.../



MOVING BLOCK - SAFETY SEPARATION CONTROL STRATEGY FOR VEHICLES

Remarquons que la bonne marche des équipements est vérifiée en permanence :

- . La bonne communication véhicule \longleftrightarrow voie (de type A.46) est vérifiée par des bits de redondance et des tests de plausibilité.
- . Pour le VCC, 3 calculateurs travaillent en vote majoritaire (2 parmi 3).
- . Pour le VOBC, 2 microprocesseurs, mis en "ET" fonctionnent en test croisé. La détection d'une différence, ou d'un défaut par l'un des microprocesseurs, provoque un freinage d'urgence.

Notons enfin que le pilotage automatique SELTRAC peut se superposer à d'anciens systèmes à cantons fixes, comme le prouve l'expérience du métro de BERLIN. Les anciens circuits de voie assurent alors la disponibilité du système en cas de panne de SELTRAC.

.../

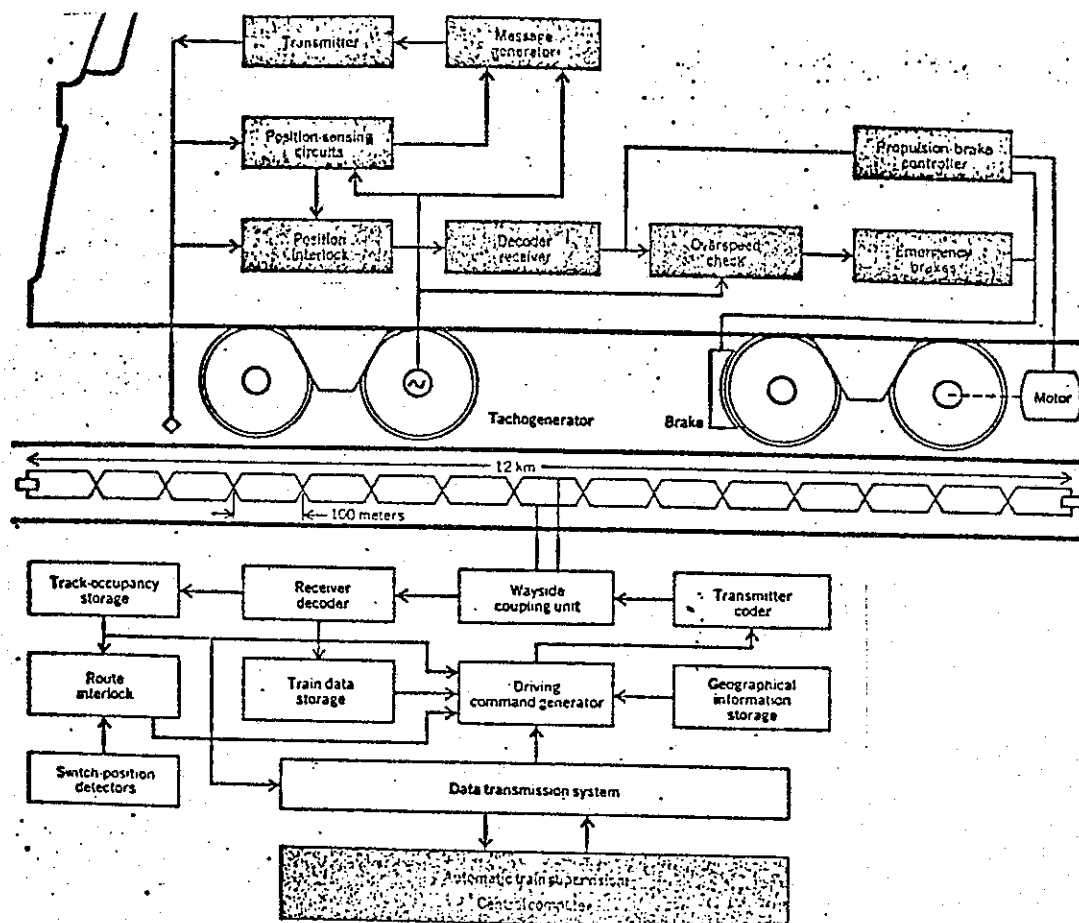
. Un métro lourd utilise le principe des cantons mobiles déformables : le S-BAHN de MUNICH, à pilotage automatique non intégral développé par la Firme SIEMENS (également utilisé pour le métro de VIENNE).

La détection se fait par une boucle conductrice qui se croise tous les 100m. Chaque boucle (de longueur d'environ 12 km) matérialise ainsi une section de la voie.

A bord, un système calcule, par les tachymètres, la distance parcourue et vérifie cette mesure par le nombre de croisements de boucles (changements de phase) rencontrés.

En permanence, le train transmet : position, vitesse, taux de freinage, aux équipements de voie. Ces derniers lui renvoient, en réponse : position but, vitesse but, et taux de freinage à appliquer.

La sécurité anti-collision est donc assurée par les équipements de voie (par la condition, classique, d'un espacement entre trains supérieur à la distance minimale de freinage), avec cette particularité que le taux de freinage, habituellement calculé par la logique embarquée, est ici calculé par les équipements de voie.



.../

Le cas du "MAGLEV", système à sustentation magnétique installé à l'aéroport de BIRMINGHAM, est un peu particulier : il s'agit d'une navette à 1 véhicule. Aucun dispositif anti-collision n'est donc nécessaire. Nous citerons simplement quelques données importantes relatives au système :

La communication véhicule \longleftrightarrow voie utilise une boucle inductive à croisements équidistants, permettant au véhicule de se repérer et de suivre un programme mémorisé lors de l'arrêt à la station précédente. Un contrôle de la vitesse est effectué à bord par comptage de plots équitemps disposés le long de la voie.

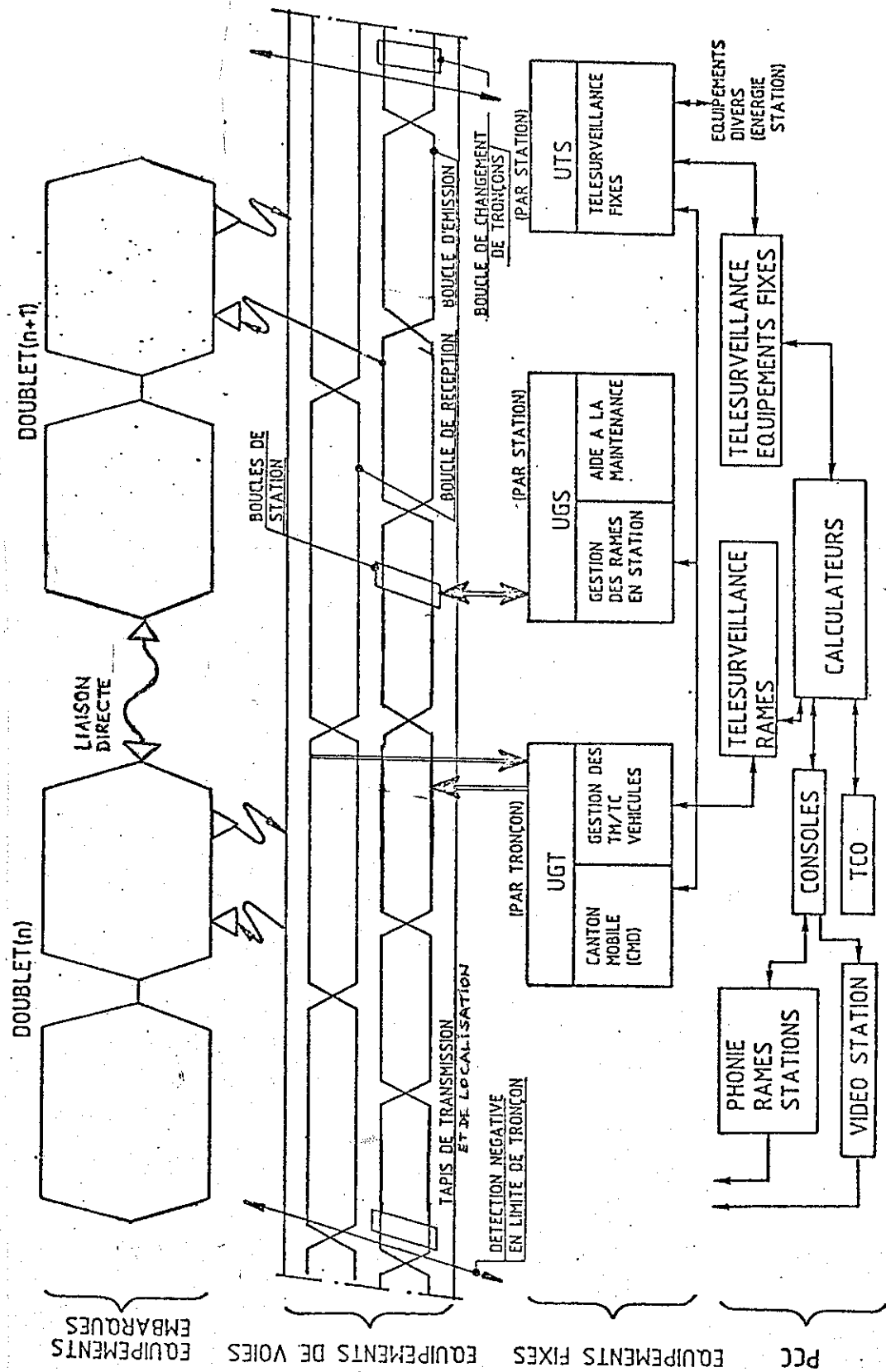
. Le système ARAMIS, de MATRA, est particulièrement original : des "doublets" de petite capacité (20 places) circulent en rames, par l'intermédiaire d'un accouplement immatériel (liaisons haute fréquence et ultra-sons) autorisant leurs séparations et leur regroupements aux aiguillages. De plus, les doublets sont orientés par un dispositif d'aiguillage embarqué.

La ligne est divisée en tronçons de 1 km, chacun géré par une Unité de Gestion de Tronçon (UGT).

Chaque doublet mesure son abscisse par rapport à l'origine du tronçon en comptant le nombre de repères équidistants de 1m, constitués par les croisements d'une ligne bifilaire (boucle continue d'émission et boucle continue de réception). Cette mesure est vérifiée par une autre mesure, utilisant une roue phonique embarquée.

Le principe de la sécurité anti-collision est le suivant : chaque doublet envoie son abscisse et sa vitesse à l'UGT, qui lui renvoie abscisse et vitesse de tous les doublets. Chaque doublet calcule alors, à bord, la distance relative qui le sépare du doublet aval et deux vitesses seuil (fonctions de cette distance relative et de la vitesse du doublet aval) : l'une de protection en freinage de service, l'autre de protection en freinage d'urgence.

Chaque doublet compare enfin sa vitesse réelle à ces deux vitesses seuil et déclenche l'action nécessaire (freinage de service, freinage d'urgence, ou propulsion normale).



ARAMIS : ORGANISATION DES AUTOMATISMES

(DOCUMENT MATRA)

. Intéressons-nous maintenant à un système fort original : le H-BAHN Allemand qui fonctionne depuis 1984 à l'Université de DORTMUND et qui est le premier système allemand de transport public à automatisme intégral.

Ce système, développé par SIEMENS et DUEWAG, fonctionne en navette sur une voie unique (sauf dans les zones des stations où la voie est double), et a pour particularité que toutes les fonctions de sécurité sont assurées, de manière redondante, par des équipements spécifiques au sol.

La détection de présence est réalisée par l'intermédiaire de capteurs ponctuels (délimitant ainsi des "mini-cantons") qui sont sensibles au passage de petits ailerons en tôle disposés sur les véhicules.

Chaque véhicule étant doté de plusieurs ailerons équidistants, ce procédé permet, de plus, de calculer la vitesse des véhicules. Le "module de surveillance", dont la mémoire contient les intervalles à respecter entre véhicules, peut alors assurer la sécurité anti-collision : la haute tension est coupée en cas de rapprochement excessif des rames. Il n'existe donc pas de fonction d'arrêt en freinage de service. La supervision du système devra permettre la coordination du départ des rames de manière à éviter de tels rapprochements.

Notons enfin que la ligne de DORTMUND est contrôlée par deux modules de surveillance (chacun s'occupant d'une partie de la ligne) ; la liaison est réalisée par fibre optique.

. Le système TAU, développé en BELGIQUE par les sociétés ACEC, BN et CRTH, a pour particularité d'être le premier système léger (si on excepte les systèmes à "moteurs à induction linéaire") à utiliser un roulement sur fer. L'utilisation d'un nouveau bogie orientable autorise des rayons de courbure de 10m.

Ce système, spécialement conçu pour limiter les coûts d'infrastructures, utilise un procédé de pilotage automatique assez similaire à SELTRAC (UTDC) : une boucle inductive à croisements équidistants, de type "B 3" (comme pour le métro de Lyon), assure la liaison véhicule ↔ P.C.C. La sécurité anti-collision est assurée comme celle de SELTRAC, à la différence près qu'en raison de la faible longueur des lignes prévues à court terme (16 km), les équipements de voie sont centralisés. (On se souvient que, pour SELTRAC, il y avait un "VCC" pour 30 km de voie simple).

V - LES SYSTEMES A VEHICULE PASSIF

Bien entendu, pour ces systèmes, les fonctions de sécurité sont assurées à l'extérieur du véhicule.

Nous aborderons 4 systèmes : le Wedway, le M-Bahn, le Poma 2000, et le système CTM.

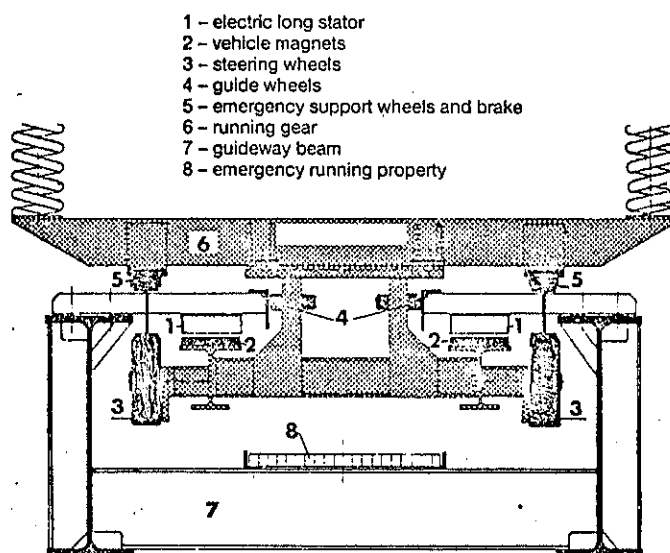
. Le système Wedway est développé par la Compagnie Walt Disney et installé au Disney World de Floride, en boucle fermée. Les trains sont propulsés par des moteurs à induction linéaire (LIM), dont la partie active est sur la voie et la partie passive sous le véhicule. A chaque instant, il y a au moins 4 LIM sous chaque train.

La détection de présence est réalisée par des "détecteurs de proximité" magnétiques, qui sont placés sur les LIM. Activés, ces détecteurs mettent le LIM en marche.

La vitesse des véhicules est imposée par les LIM, grâce à un profil de vitesse, prédéterminé par zone et stocké dans les cartes logiques des LIM.

Le principe de la sécurité anti-collision est le suivant : pour chaque véhicule, une "zone morte" est créée en amont (dont la longueur dépend du programme de vitesse en vigueur à cet endroit). Des vitesses convenables sont alors transmises aux LIM par câble, sous forme de messages de 8 bits. Signalons que la vitesse des trains est calculée au sol par d'autres détecteurs (détecteurs "lead / lag"), sensibles à la lumière.

. Le M-BAHN est un véhicule passif à sustentation magnétique. Il peut être intéressant de rappeler brièvement le principe de la sustentation magnétique : des aimants permanents, fixés au châssis et alimentés par des convertisseurs, exercent leur force d'attraction en-dessous de la voie. Le véhicule est alors propulsé par un "champ glissant" (créé par un câble alimenté en courant triphasé), qui "tire" l'aimant et met le véhicule en mouvement (entraînement linéaire synchrone).



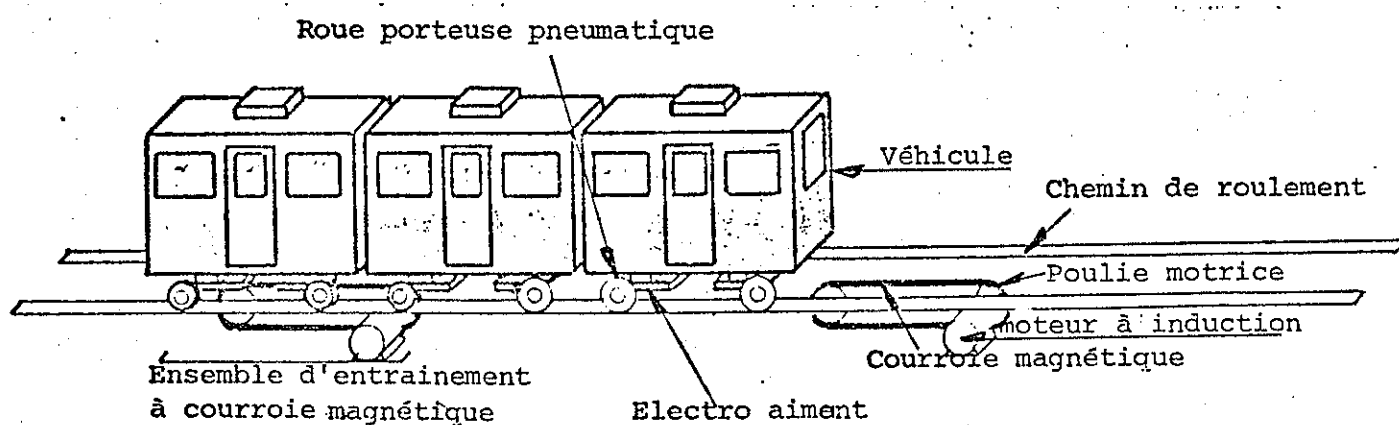
Principe de la sustentation et du guidage du M-Bahn.

La détection de présence est effectuée par des activateurs placés sur la voie. Cette dernière est divisée en zones (de 80m à 200m), chaque zone correspondant à un stator.

Toutes les fonctions de sécurité sont traitées au sol, de manière centralisée : le véhicule transmet au PCC sa position et sa vitesse.

Une chaîne non sécuritaire transmet alors à la voie une consigne de puissance (fonction de la topographie, des contraintes de régulation et des positions et vitesses de tous les véhicules), tandis qu'une chaîne sécuritaire (constituée de deux processeurs en parallèle travaillant en test croisé) contrôle l'espacement des véhicules, qui doit être supérieur à la distance absolue de freinage (distance de freinage d'urgence).

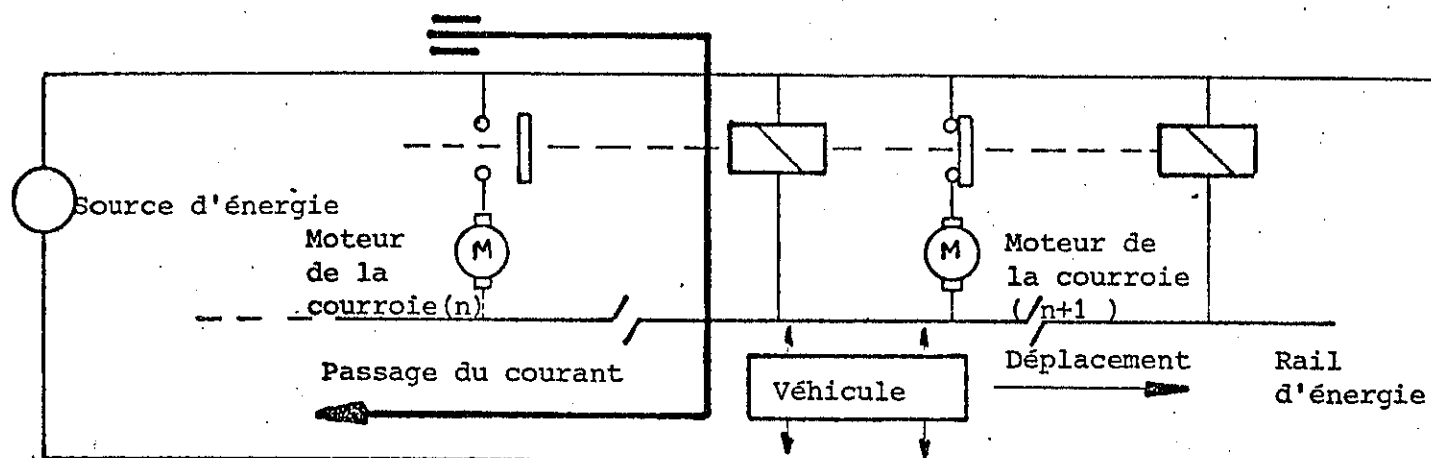
. Le système japonais CTM (Continuous Transit System by Magnet) utilise un moyen de propulsion particulièrement original : des courroies magnétiques, entraînées en rotation par des moteurs électriques, sont disposées sur la voie. Des électro-aimants, placés sous les véhicules, viennent se "coller" sur ces courroies. De cette manière, la vitesse de la courroie se synchronise sur la vitesse du véhicule qui arrive dessus.



PRINCIPE DE LA PROPULSION PAR COURROIE MAGNETIQUE

La détection de présence et le dispositif anti-collision sont réalisés par fermeture d'une boucle de courant (c'est le même principe que les classiques "circuits de voie") : le passage d'un véhicule ferme la boucle dans laquelle se trouve un relais qui ouvre le circuit d'alimentation du moteur de la courroie se trouvant en amont de la rame (notons qu'il y a toujours au moins un électro-aimant d'une rame en contact avec une courroie).

Ce dispositif anti-collision, qui n'en est encore qu'au stade de l'expérimentation, n'est satisfaisant qu'à basse vitesse. Pour les zones à plus grande vitesse, il y a un regroupement des unités de détection de présence. Dans le futur, sans doute y aura-t-il une détection de présence supplémentaire : peut être, par l'émission d'une fréquence sur les boucles (moyen actuellement utilisé pour l'évacuation d'urgence).



PRINCIPE DE DETECTION DES RAMES ET DE SECURITE ANTI-COLLISION

. Le système POMA 2000 de LAON est, lui aussi, assez original : le véhicule est relié par une pince débrayable à un câble qui tourne à vitesse variable. Il y a un câble et, au maximum, un véhicule par interstation et par direction.

Le problème de la sécurité anti-collision ne se pose pas en interstation : le câble impose une vitesse bien définie aux véhicules et maintient avec sûreté leurs positions relatives.

Il n'en est pas de même dans les zones de station où le véhicule doit s'arrêter et passer sur le nouveau câble.

Nous verrons ces problèmes et la manière dont ils sont résolus dans le chapitre "Arrêt en station".

On voit qu'il n'y a pas une manière d'assurer la sécurité anti-collision, mais de nombreuses manières.

Cependant, quelques remarques s'imposent :

- Les circuits de voie sont progressivement abandonnés, même pour les systèmes à roulement fer (UTDC, TAU).
Ils sont peu adaptés à des systèmes de transport sans conducteur pour la raison suivante : la communication véhicule-voie n'est qu'unilatérale car les circuits de voie se prêtent mal à une transmission véhicule voie. Une communication acceptable nécessite alors l'ajout d'un rail supplémentaire ou d'un câble de transmission.

 - Il faut bien distinguer les notions de "zone de freinage de service" et de "zone de freinage d'urgence".
Certains systèmes (H-BAHN) n'utilisent pas de zone de freinage de service. C'est alors l'ordinateur central du réseau (qui assure les fonctions de supervision) qui évitera que le système se mette en situation critique déclenchant le freinage d'urgence.
Par contre, la "zone de freinage d'urgence" existe dans tous les systèmes, qu'elle s'appelle "canton tampon", "overlap", etc....

 - Les dispositifs anti-collision évoluent, logiquement, de manière à obtenir des intervalles les plus petits possibles entre trains :
 - canton fixe + canton tampon
 - puis, canton fixe + "zone de sécurité"
 - puis, cantons mobiles déformables.
- Parallèlement, ces dispositifs évoluent également de manière à nécessiter le moins possible d'équipements au sol.

REGULATION DE VITESSE ET DETECTION DE SURVITESSE

Remarquons bien tout d'abord que la régulation de vitesse est une fonction de pilotage automatique et que la détection de survitesse est une fonction de sécurité.

Ces fonctions, bien entendu, ne sont pas totalement indépendantes des autres fonctions que nous étudions ici.

En particulier, la régulation de vitesse est liée au dispositif anti-collision (étudié au chapitre précédent), puisque nous avons vu que, pour éviter toute collision, le train recevait à chaque instant une consigne de vitesse ou était asservi à suivre un programme de vitesse donné.

Nous ne rappellerons pas ici, comme d'ailleurs dans les chapitres suivants, certaines données élémentaires relatives à chaque système qui ont déjà été explicitées dans le chapitre "Sécurité anti-collision" : par exemple, la communication véhicule \longleftrightarrow voie.

Cependant, ces données étant essentielles pour la bonne compréhension de chaque système, le lecteur aura intérêt à se reporter à ce chapitre quand il le jugera nécessaire.

LA REGULATION DE VITESSE

Le dispositif de régulation de vitesse a pour but d'amener, à chaque instant, le train à une vitesse aussi proche que possible de la vitesse théorique souhaitée.

.../

Ce dispositif agit donc sur les commandes de propulsion et de freinage.

Tout d'abord, la vitesse réelle du train doit être connue à chaque instant. Pour ce faire, il y a deux procédés principaux :

- Par comptage de tours de roue. C'est un moyen autonome utilisant, soit une roue phonique, soit une génératrice tachymétrique classique. Il peut être intéressant de rappeler le principe de la roue phonique : une roue phonique est généralement une roue métallique dentelée. Le passage des dents est détecté par un circuit accordé associé à un compteur ou une horloge, il peut être aussi détecté par une cellule photo-électrique.
- Par l'utilisation d'une liaison véhicule \longleftrightarrow voie. Dans certains systèmes, la vitesse est calculée en détectant les croisements équidistants d'une boucle conductrice placée sur la voie, ou en comptant des plots (ou d'autres repères) placés le long de la voie. Connaissant l'espacement entre ces croisements ou ces plots, le train peut déduire sa vitesse.

Les systèmes Westinghouse (sauf Gatwick Airport), UMI, JETRAIL, FAIRLANE, UTDC, S-BAHN, utilisent une mesure par tachymètres.

Les métros de LYON et de MARSEILLE, le système ARAMIS utilisent une mesure par roue phonique.

Des repères équitemps sont utilisés par les systèmes suivants : V.O.N.A. (balises), VAL (croisements de boucles), Westinghouse Gatwick (plots).

D'autres procédés, moins courants, peuvent être utilisés : par exemple pour le Maglev de l'aéroport de Birmingham, la vitesse réelle est calculée par des radars à effet Doppler ; pour le H-BAHN, la vitesse est calculée au sol par des "ailerons".

Pour le moment, nous n'avons rien dit des systèmes à véhicule passif. Pour eux, la vitesse réelle est calculée au sol, au passage du train. La mesure peut être effectuée par des détecteurs sensibles à la lumière (le faisceau lumineux est obstrué au passage du train) : c'est le cas du système Wedway. Pour le système CTM, par contre, la vitesse réelle n'est pas calculée.

Une fois que la vitesse réelle est connue (les mesures sont en général effectuées par 2 équipements redondants et comparées), le dispositif de régulation de vitesse peut comparer la vitesse réelle avec la vitesse de consigne, et asservir la vitesse autour d'une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de consigne. Cet asservissement consiste à envoyer des commandes (propulsion ou freinage de service) aux moteurs.

LA DETECTION DE SURVITESSE

Indépendamment de la régulation de vitesse, effectuée autour de la vitesse souhaitée, il y a, dans tous les cas, un seuil de vitesse à ne pas dépasser.

Dès que la vitesse réelle mesurée est supérieure à cette vitesse maximale autorisée, un freinage d'urgence irréversible est automatiquement déclenché.

Dans certains systèmes (en particulier dans les systèmes à automatisme non intégral où le conducteur peut actionner le frein de service pour ramener la vitesse du train sous le seuil de survitesse), un certain délai, n'excédant pas quelques secondes, peut être accordé. Si, passé ce délai, la survitesse est toujours effective, alors le freinage d'urgence irréversible est déclenché.

Notons bien que, pour les systèmes à repères équitemps, la survitesse n'est pas basée sur une mesure de la vitesse, mais sur la mesure d'un temps. Nous prendrons un seul exemple : pour le VAL, la vitesse souhaitée, en mode normal ou perturbé, est telle que l'on rencontre un croisement de boucle toutes les 0,3 seconde.

Dès que le temps entre les croisements est inférieur à 0,27 seconde, il y a survitesse, donc freinage d'urgence irréversible.

En conclusion de ce chapitre, deux remarques :

- Le radar à effet Doppler semble promis à un brillant avenir. La mesure de la vitesse, indépendante des tours de roue, n'est pas affectée par l'éventuel enraillage ou patinage des roues. Pour le moment, seul le Maglev de Birmingham l'utilise.
- Le H-BAHN est décidément un système original puisque la sécurité anti-survitesse est effectuée au sol.

LA SECURITE DES ENCLENCHEMENTS D'ITINERAIRES

Nous distinguerons ici deux catégories de systèmes :

- les systèmes où les stations sont "on-line", c'est-à-dire aux abords de la voie principale,
- les systèmes où les stations sont "off-line", c'est-à-dire que le véhicule doit emprunter une voie auxiliaire pour accéder à la station, puis revenir sur la voie principale.

La première de ces catégories ne nous intéressera guère dans ce chapitre. En effet, il n'y a souvent d'aiguillages qu'en bout de ligne (quand le sens de marche du véhicule est inversé), ou pour l'accès à la zone de maintenance ou au garage.

Certains systèmes à petits véhicules (Boeing, Aramis) utilisent un aiguillage embarqué. Les autres systèmes utilisent un aiguillage sur la voie ("aiguillage actif") ; pour les systèmes à roulement fer, les aiguillages utilisés sont similaires à ceux utilisés dans les réseaux de voie ferrée. Pour les systèmes à roulement sur pneus, de nouveaux types d'aiguillages ont été étudiés.

Certains systèmes emploient des méthodes originales : par exemple, dans le système V.O.N.A. (à guidage central), c'est l'ensemble de la voie (piste de roulement et poutre de guidage) qui se déplace.

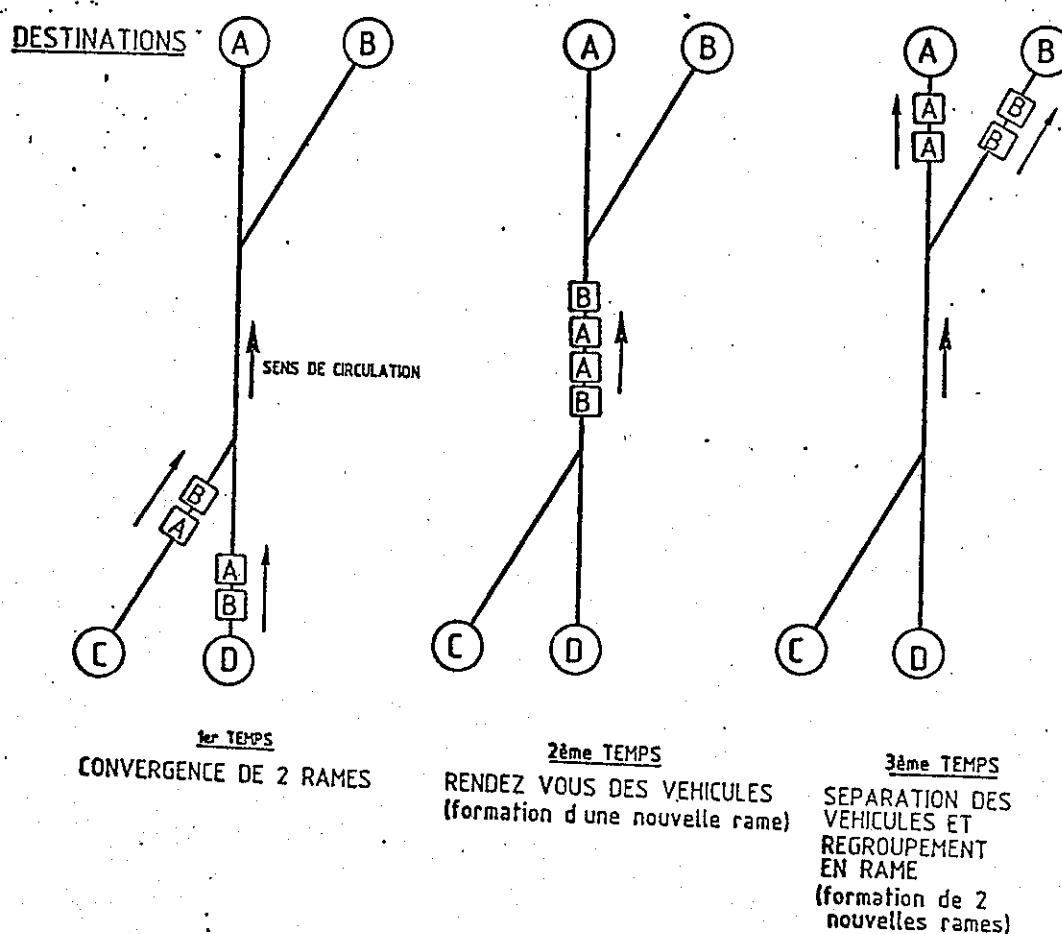
La sécurité liée à ces aiguillages est réalisée par :

- l'interdiction d'itinéraires incompatibles avec la position de l'aiguillage,
- l'interdiction de commande des aiguillages en cas d'approche ou de transit d'un véhicule,
- le contrôle du verrouillage de l'aiguillage,
- le contrôle de la vitesse du train aux abords de l'aiguillage.

.../

Si cette sécurité (assurée par des relais de sécurité, sauf pour le système UTDC où elle est assurée par logiciel dans les VCC) n'est pas respectée, il y a freinage d'urgence.

S'il est vrai que les systèmes où les stations sont "on-line" n'apportent donc pas d'innovation majeure, il y a toutefois, comme toujours, une exception qui confirme la règle : le système ARAMIS.



PRINCIPE DE BASE DU SYSTEME ARAMIS

Les doublets, qui circulent en rame, sont orientés par un dispositif d'aiguillage embarqué.

Le principe des rames "à composition variable" permet :

- le regroupement ("Rendez-vous") de deux rames issues de deux branches convergentes pour ne former qu'une seule rame sur le tronc commun ;
- la séparation des doublets lors du passage sur une aiguille divergente, ces doublets rejoignant d'autres rames sur chacune des deux branches.

Les itinéraires des véhicules sont gérés automatiquement depuis le PCC. L'autorisation de manoeuvre de l'aiguillage embarqué n'est donnée que dans certaines zones pour éviter toute manoeuvre aux abords des aiguilles.

En amont des aiguilles, l'équipement embarqué contrôle qu'il y a concordance entre l'itinéraire mémorisé et la position de l'aiguillage. Au niveau des aiguilles convergentes, les deux branches sont fonctionnellement superposées, ce qui permet d'éviter toute collision. Au niveau des aiguilles divergentes, un système de "numéro de cible" permet une bonne répartition de tous les doublets sur les deux branches.

Dans la seconde catégorie de systèmes, où il y a des stations "off-line", nous trouverons le système de Boeing (Morgantown) et le système allemand C-BAHN (dans son concept et non dans son application à Ziegenhain). Nous omettons volontairement le système AIRTRANS car le procédé de contrôle des aiguillages (actifs) est classique.

Dans le système de Morgantown, les véhicules sont orientés par un système d'aiguillage embarqué. Les véhicules vérifient le bon positionnement de leur aiguillage et en informent les stations.

Pour les regroupements, les deux détecteurs de présence ponctuels des deux branches sont comparés et une unité logique établit alors un ordre de priorité.

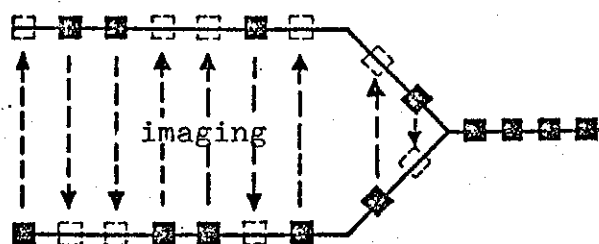
.../

Le système C-BAHN est différent.

Dans chaque véhicule (le système est conçu pour pouvoir fonctionner "à la demande"), la destination est mémorisée dès le départ sur le billet.

Pour les aiguillages divergents, un émetteur/récepteur relié à la station est placé sur la voie. Quand le véhicule se trouve à une certaine distance de l'aiguillage, cet émetteur/récepteur lit le code de destination mémorisé dans le véhicule. L'aiguillage est alors mis en position convenable, et contrôlé.

Pour les aiguillages convergents, la répartition des véhicules se fait par le principe de la "fermeture-éclair" : imaginons qu'un véhicule circule sur la branche 1. Son image virtuelle (position) est envoyée sur la branche 2 par des câbles en "V" qui passent par l'aiguillage. Les véhicules qui circulent sur la branche 2 appliquent alors leur système de contrôle d'intervalle. Ainsi, deux véhicules n'arriveront pas au même moment à l'aiguillage, ce qui assure bien la sécurité.



Notons que dans les systèmes C-BAHN et BOEING (Morgantown), toutes les stations ne sont pas "off-line" ; il y a aussi des stations "on-line".

.../

En conclusion, nous pouvons dire que :

- dans les systèmes à aiguillage embarqué (véhicule de faible gabarit), la plupart des fonctions sont traitées à bord : elles le sont en logique câblée à Morgantown, elles le seront en logique microprogrammée pour ARAMIS,
- dans les systèmes à aiguillage actif : la sécurité des enclenchements d'itinéraire utilise des relais de sécurité (comme les réseaux de chemins de fer classiques). Mais, comme déjà pour certains chemins de fer (Ericsson en Suède, les chemins de fer danois), on évolue vers une informatisation des fonctions de sécurité d'enclenchements d'itinéraire.

Dans ce domaine, les systèmes UTDC de Vancouver et Détroit constitueront très bientôt une première mondiale.

L'ARRET EN STATION

Comment le train est-il ralenti aux abords de la station ?

Comment, s'il y a des portes palières, le train s'arrête-t-il en s'alignant avec ces portes ?

Comment s'effectue l'ouverture et la fermeture des portes ?

Telles sont quelques-unes des questions auxquelles nous allons essayer de répondre dans ce chapitre.

Il nous faut distinguer deux étapes : l'asservissement d'arrêt en station, qui est la manière dont le véhicule ralentit puis s'arrête à la station et la procédure d'arrêt en station, qui est la manière dont s'effectue la vérification du bon positionnement du véhicule (c'est très important dans les systèmes où il y a des portes palières et/ou pas de conducteur) et l'ouverture et la fermeture des portes, ainsi que le contrôle du temps d'arrêt.

Comme nous l'avons dit précédemment, nous ne reviendrons pas sur les moyens de communication véhicule \longleftrightarrow voie de chaque véhicule. Aussi, pour permettre au lecteur de pouvoir consulter facilement et rapidement ces informations dans le chapitre "Sécurité anti-collision", nous conserverons ici la même classification.

I - SYSTEMES A CANTONS FIXES AVEC CONSIGNE DE VITESSE PAR CANTON

1. Les systèmes à détection ponctuelle

. Dans le système BOEING de Morgantown, l'asservissement d'arrêt est réalisé par une boucle inductive spéciale ("boucle d'arrêt"). Cette boucle est courte (3,6m) car, les stations étant off-line, les véhicules sont déjà fortement ralentis sur la voie de décélération, par l'envoi de consignes de vitesse décroissantes.

D'autre part, le véhicule transmet à l'unité de contrôle en station, via le PCC, un message contenant en particulier l'état des portes.

.../

Cette unité de contrôle peut alors gérer la séquence de stationnement. La vérification de la position est réalisée par l'intermédiaire de détecteurs de présence très rapprochés, cette vérification n'est pas fondamentale, puisque le système de Morgantown est un des rares systèmes ne possédant pas de portes palières.

. Dans le système V.O.N.A., l'arrêt en station est réalisé entièrement manuellement par le conducteur de la rame. (Nous parlons ici de la "Yukarigaoka Line", puisque le V.O.N.A. n'est pas encore exploité en automatisme intégral). Seules des balises de contrôle de vitesse, de plus en plus rapprochées, contrôlent l'arrêt. Il n'y a donc pas ici de système "d'asservissement d'arrêt". La gestion de la séquence de stationnement est également réalisée par le conducteur.

2. Les systèmes à détection par contact de frotteurs sur un "rail de signalisation"

. Le système WESTINGHOUSE de l'aéroport d'Atlanta utilise la notion de "programme d'arrêt". Le principe est le suivant : une boucle de 200m, à croisements équidistants, est placée au sol avant le point d'arrêt. Les antennes embarquées reçoivent alors de cette boucle un signal de 7 KHz donnant la distance fixe à parcourir pour arriver à la station. En comptant le nombre de croisements, le calculateur de bord peut alors calculer la bonne décélération à appliquer pour aligner le véhicule avec les portes palières (tolérance ± 15 cm). Le calculateur de bord agit sur le régulateur de vitesse. La vérification du bon positionnement du véhicule se fait alors par couplage de l'antenne embarquée et d'une boucle courte en station.

Notons que la boucle d'arrêt de 200m peut être énergisée ou non par le PCC, ce qui permet de passer, éventuellement, des stations.

Il arrive, comme dans le système WESTINGHOUSE de Gatwick, que la ligne soit très courte (300m). Dans ce cas, l'asservissement de vitesse par croisements de boucle est effectué sur toute la voie.

.../

Revenons au système d'Atlanta, et examinons la procédure d'arrêt en station.

Quand le train est arrêté (il faut les deux conditions suivantes : vitesse nulle et frein appliqué) et aligné, il en informe la station par un signal. Le train reçoit alors un signal afin que ses portes s'ouvrent et répond par un autre signal commandant aux portes palières de s'ouvrir également. Cette communication passe bien entendu par la boucle courte de station.

. Dans le système AIRTRANS, de l'aéroport de Dallas Fort Worth, le principe de l'arrêt consiste apparemment (nous n'avons que peu de renseignements) à abaisser le nombre de pulsations du tachymètre suivant un profil donné. Par sécurité, une mesure par vernier est aussi effectuée à 3m du point d'arrêt. La précision d'arrêt est de ± 18 cm. La séquence de stationnement se fait par le dialogue permanent véhicule \longleftrightarrow station, via les deux "rails de signalisation".

. Pour la navette de FAIRLANE, le rail de signalisation est divisé en segments équitemps (24 segments en tout), à mesure que l'on s'approche de la station. Dans la zone de décélération (environ 100m), l'asservissement est contrôlé 2 fois par seconde. L'asservissement de position est réalisé par un BVS ("Begin Vernier Stop") avec une précision de ± 30 cm.

3. Les systèmes à circuits de voie

. Pour le métro de LYON, les croisements des boucles "B3" se "resserrent" paraboliquement aux abords des stations. L'asservissement d'arrêt suit alors le principe des croisements équitemps : entre deux croisements successifs, il ne doit pas s'écouler moins d'un temps constant (0,5 seconde).

Les ordres d'ouverture et de fermeture des portes sont transmis par les lignes "B3".

.../

. Le métro de MARSEILLE utilise des petites balises simples (bobines d'induction émettant des fréquences entre 20 et 40 KHz). A bord du véhicule se trouvent des capteurs de balises. L'asservissement d'arrêt par cette méthode autorise une bonne précision.

En station, des fréquences basses modulées sont surimposées aux impulsions des circuits de voie pour assurer le service automatique des portes.

. L'arrêt en station du métro de LONDRES ("Victoria Line") se fait par l'intermédiaire de six balises (générateurs de fréquence audio), placées avant la station, qui transmettent une fréquence proportionnelle à la vitesse désirée en ce point (les fréquences décroissent donc).

Le taux de freinage est constamment contrôlé par comparaison avec l'accéléromètre.

. Le B.A.R.T. de San Francisco utilise le même procédé d'arrêt en station que le système Westinghouse d'Atlanta Airport.

. Le JETRAIL de Dallas utilisait (il n'est plus exploité) un système d'asservissement d'arrêt par les commandes de vitesses (c'est-à-dire les potentiels) transmis aux segments.

Les portes glissantes s'ouvriraient automatiquement par un procédé électromécanique. Quant aux portes palières, reliées aux détecteurs de position du véhicule, elles ne s'ouvriraient que si le véhicule était bien positionné.

.../

4. Systèmes à détection par réception d'émissions provenant du train par des antennes placées le long de la voie

. Les systèmes WESTINGHOUSE utilisant ce système de détection (Tampa, Seattle-Tacoma....), utilisent un procédé d'arrêt en station très similaire à celui du système Westinghouse d'Atlanta. Notons simplement qu'à Tampa Airport, l'asservissement d'arrêt n'est pas fait par l'intermédiaire de câbles à croisements équidistants, mais de "plateaux" inducteurs placés le long de la voie à intervalles équidistants.

. Dans le système de KOBE, l'asservissement d'arrêt est réalisé par un programme de vitesse, émis par une boucle de ralentissement à croisements équidistants, placée au sol aux abords de la station (longueur d'environ 200m au maximum).

Des balises de ralentissement permettent d'anticiper la baisse des consignes de vitesse.

Lorsque le véhicule est arrêté et positionné en face des portes palières, une boucle courte de station permet le dialogue véhicule \longleftrightarrow station. L'équipement de station gère alors le temps d'arrêt et les séquences d'ouverture et de fermeture des portes palières.

. Le NEW-TRAM d'Osaka utilise une procédure d'arrêt en station tout à fait similaire à la procédure précédente. Par contre, l'asservissement d'arrêt n'est réalisé que par décodage de 3 balises successives disposées sur la voie.

Dans les systèmes de KOBE et d'OSAKA, l'asservissement de position permet une précision d'arrêt de ± 30 cm.

.../

II - SYSTEMES A CANTONS FIXES AVEC PROGRAMME DE VITESSE INSCRIT SUR LA VOIE

Pour le VAL :

L'asservissement d'arrêt est naturellement réalisé par le programme de vitesse disposé sur la voie.

L'asservissement de position est réalisé par une balise disposée à faible distance (quelques mètres) du point d'arrêt, ce qui permet une précision de ± 20 cm.

La gestion de la séquence de stationnement est réalisée par l'E.A.S. (Electronique d'Arrêt en Station) par l'intermédiaire d'une boucle courte appelée "boucle L.S.V." (Liaison Station-Vehicule).

L'E.A.S. vérifie en particulier que :

- la vitesse est nulle,
- le frein d'urgence est enclenché,
- le véhicule est bien positionné (via la boucle L.S.V.)

avant d'autoriser l'ouverture des portes.

III - SYSTEMES A CANTONS MOBILES DEFORMABLES, LES CANTONS ETANT DEFINIS PAR MESURE DE POTENTIEL OU DE COURANT

. Dans le système UMT de King's Dominion, l'arrêt en station utilise le dispositif anti-collision. Tout se passe comme s'il y avait un train (imaginaire) arrêté en aval de la station. En vertu de la sécurité anti-collision, ceci provoque l'arrêt du train à la station :

Près de la station, le rail est shunté par différentes impédances, simulant ainsi les différentes distances auxquelles se trouve le train imaginaire (on peut jouer sur ces distances entre impédances pour obtenir le profil de décélération voulu). L'arrêt est réalisé avec une précision de ± 15 cm.

L'ouverture et la fermeture des portes se fait manuellement.

.../

. Nous avons peu de renseignements sur l'arrêt en station du C-BAHN allemand.

Apparemment, les cabines sont asservies à l'arrêt par un signal qu'elles reçoivent de la part d'un émetteur/récepteur placé le long de la voie.

La séquence de stationnement est alors gérée par l'"Unité de Contrôle en Station". Notons que, pour le moment, les portes sont mécaniques (en accordéon) et que l'Unité de Contrôle en Station reçoit en permanence les informations concernant l'état des trains (via les émetteurs/récepteurs), en particulier l'état des portes.

IV - LES AUTRES SYSTEMES A CANTONS MOBILES DEFORMABLES

. L'arrêt en station des véhicules d'UTDC utilise les mêmes liaisons que le dispositif anti-collision, à savoir une boucle inductive à croisements équidistants. Ainsi, le véhicule est asservi à l'arrêt par des consignes de vitesse décroissante, et par la connaissance à tout instant de son point d'arrêt : il peut réaliser un bon asservissement de position à basse vitesse.

La séquence de stationnement est gérée par le VCC. (Rappelons que le message envoyé en permanence par le VOBC au VCC contient l'état des portes).

Une vérification du bon positionnement ne semble pas nécessaire puisque le système UTDC ne possède pas de portes palières. (Le système SELTRAC utilisé dans le métro de BERLIN ne possède pas non plus cette fonction de vérification).

. Le MAGLEV de Birmingham, connaissant sa position à chaque instant en détectant les croisements de la boucle inductive, réalise un asservissement d'arrêt grâce au parcours mémorisé à bord du véhicule.

En station, une boucle courte permet une communication véhicule \longleftrightarrow voie. Cette boucle courte permet aux équipements de stations de gérer : la vérification de la position (alignement du véhicule avec les portes palières) et la procédure d'arrêt (ouverture et fermeture des portes, temps d'arrêt). Par cette même boucle locale, le véhicule reçoit toutes les informations concernant le prochain voyage (direction, distances.....).

. les doublets d'ARAMIS ont en mémoire toutes les données relatives à la voie (topographie, position des stations...) sous forme d'invariants dont ils se servent pour calculer les consignes de vitesse seuil. Ils sont donc asservis à l'arrêt par génération de consignes décroissantes. Des petites boucles locales en station permettent la communication véhicule \longleftrightarrow voie. La séquence de stationnement est gérée par l'U.G.S. (Unité de Gestion de Station).

Les portes ne peuvent s'ouvrir que si le positionnement est correct et la vitesse est détectée nulle.

La séquence automatique de stationnement comprend :

- l'autorisation d'ouverture des portes,
- le contrôle du temps d'arrêt,
- l'autorisation de fermeture des portes,
- l'autorisation de démarrage en station,
- la transmission d'un message de maintenance.

. Le micro-ordinateur de bord du H-BAHN (de type Siemens MES 80) réalise l'asservissement d'arrêt en station puisqu'il connaît, à chaque instant, la position, la vitesse du véhicule et le point d'arrêt.

Le bon positionnement du véhicule met en jeu des capteurs spécifiques qui consistent en :

- des contacts sur la voie alimentés sous tension continue,
- des frotteurs situés sur le véhicule et reliés entr'eux.

La tolérance sur la précision admise est de ± 20 cm.

La commande des portes des véhicules et des stations s'effectue à partir du sol, grâce à d'autres contacts (une paire pour alimenter les moteurs de commande, et une paire pour transmettre vers le sol des informations sur l'état des portes et des freins).

L'ouverture des portes ne peut alors se faire que si le véhicule est bien positionné, freins serrés.

Notons enfin l'existence d'une installation d'accostage et d'arrimage en station. Cette installation a pour but d'éviter les mouvements de pendule de la cabine grâce à un dispositif de guidage s'appuyant sur des rails fixés sous la cabine.

. L'arrêt en station du TAU belge est effectué par le calculateur de bord qui connaît la position et la vitesse du véhicule, et a en mémoire la topographie de la voie et les points d'arrêt des stations.

Le dialogue en station passe par les boucles "B3". La vérification de la position utilise des capteurs optiques.

V - LES SYSTEMES A VEHICULE PASSIF

. Pour le WEDWAY, l'asservissement d'arrêt est réalisé par le programme de décélération "inscrit" sur les LIM. Les portes sont ouvertes quand le véhicule arrive en station par une came fixée au rail. Au départ de la station, une autre came ferme les portes.

. Pour le CTM, l'asservissement d'arrêt est de même réalisé par les courroies dont la vitesse baisse à l'approche des stations.

L'ordre d'ouverture et de fermeture des portes est transmis par une tension continue sur deux rails spécifiques (un rail pour l'ouverture, un pour la fermeture).

Quand les portes sont détectées fermées, l'équipement de station commande la courroie de démarrage.

. Rappelons que le câble du système POMA 2000 de Laon (un câble et, au maximum, un véhicule par interstation et par direction) assure lui-même la décélération et l'accélération des cabines. Le câble entraîne un générateur d'impulsions (roue optique), dont les signaux servent "d'ordres de passage" en des points successifs (balises), ce qui permet de connaître à tout instant la position du véhicule (c'est-à-dire la "longueur déroulée de câble").

En outre, l'utilisation de 4 balises de repositionnement placées en des points stratégiques permet de détecter les passages réels et de redresser immédiatement les erreurs éventuelles (léger glissement du câble par rapport à la pince....).

.../

L'asservissement d'arrêt du câble est alors réalisé en concordance avec le générateur d'impulsions.

Il n'y a pas de portes palières, l'asservissement de position autorise donc une tolérance élevée (± 50 cm environ).

Une fois que le véhicule est arrêté par le câble, un patin-frein immobilise de manière sûre le véhicule.

L'ouverture des portes est déclenchée par un signal : des frotteurs (à bord) rentrent en contact avec un rail d'alimentation, en station.

La gestion de la séquence de stationnement est effectuée à bord par le PAC (Pilote Automatique Contrôlé), qui communique avec la station via des petites boucles inductives locales.

Parallèlement, la pince vient se fixer sur le nouveau câble par une came. Un vérin électrique, sur le véhicule, verrouille ensuite la pince. La bonne fixation du câble dans la pince est vérifiée par un système de détecteurs.

Après fermeture automatique des portes, les cabines sont accélérées par le nouveau câble.

Notons que, le générateur d'impulsions étant entraîné par le câble, les espacements sont bien maintenus, quelle que soit la vitesse du câble (arrêt, etc....).

Pour conclure, nous ferons 4 remarques :

- Tout asservissement d'arrêt en station précis comporte un asservissement de position. Cet asservissement peut être fait tout le long du ralentissement par le pilote automatique (Westinghouse, Kobé, Osaka...), ou seulement quand le véhicule est déjà presque arrêté (Morgantown, VAL....). Dans ce dernier cas, le véhicule est ralenti par les consignes de vitesse ATP.
 - De même, pour les systèmes sans conducteur et avec des portes palières en station, il est toujours nécessaire d'effectuer une vérification du bon positionnement du véhicule.
- En général, une boucle courte est utilisée. Cependant, la vérification peut aussi être faite par contact matériel (CTM, H-BAHN) ou par capteurs optiques (TAU).

.../

- Pour réduire le temps d'attente en station, des systèmes à "embarquement mobile" furent conçus.

Au Disney World de Floride (système Wedway), les passagers arrivent, par une rampe mobile, sur une plateforme tournante. Les véhicules tournent autour de la plateforme avec la même vitesse que celle-ci (de manière synchronisée, donc).

Ainsi, le passager n'attend pas avant de pouvoir monter dans un véhicule. Ce genre de procédé, très populaire dans les années 70, n'est plus guère utilisé. D'ailleurs, le système de l'aéroport de Houston, construit plus tard (1981) par les concepteurs du Wedway de Floride, utilise un procédé classique avec arrêt complet et portes palières.

Notons toutefois que les concepteurs japonais de CTM proposent de doter leur système de stations "à embarquement mobile" (à l'exportation seulement, car les lois japonaises refusent ce genre de procédé).

- L'emploi de portes palières représente un élément de sécurité indiscutable, qui a beaucoup contribué à l'acceptation des systèmes automatiques par le public.

Cependant, il s'agit de dispositifs relativement coûteux et il n'est pas sûr qu'ils soient absolument indispensables.

La preuve en est que certains systèmes importants (UTDC et, à moindre échelle, Morgantown) n'utilisent pas de portes palières.

LA SUPERVISION DU RESEAU

Il est difficile de traiter la fonction de supervision de manière systématique, car elle est très liée à chaque cas particulier d'implantation d'un système.

Nous aborderons les points suivants :

- Echange d'informations entre le véhicule et le PCC (Poste Central de Contrôle)
- Liaison phonique entre les voyageurs et le PCC
- Problème de la régulation de trafic.

L'échange d'informations entre le véhicule et le PCC

C'est une fonction spécifique des systèmes de transport automatique. Elle a pour but d'aider à la disponibilité du système : en cas de panne ou de problème dans une rame, le PCC peut alors prendre les mesures nécessaires pour assurer la qualité de service souhaitée.

Par exemple, en cas de panne d'une rame, le PCC est immédiatement prévenu et peut alerter le personnel de maintenance.

En cas d'incendie, le PCC peut déclencher immédiatement la procédure d'évacuation d'urgence.

D'une manière générale (quand la liaison existe), les véhicules transmettent au PCC des informations concernant leur état (état des sous-systèmes : portes, etc.... et alarmes éventuelles), et le PCC transmet au véhicule des ordres à exécuter. Ces ordres peuvent être directement liés à la sécurité du système, ou ne concerner que la régulation du trafic.

.../

Cet échange d'informations peut être une liaison radio en duplex (V.O.N.A., Westinghouse, Atlanta, H-Bahn), ou utiliser les liaisons déjà existantes : par l'intermédiaire des équipements de voie (Kobé, UTDC, Aramis, VAL...), ou des équipements de station (C-Bahn, Morgantown). L'échange est alors, soit continu, soit seulement lors des arrêts en station.

Notons que, dans les systèmes à automatisme non intégral (avec conducteur), le pilote automatique n'est pas redondant : en cas d'une panne de celui-ci, le conducteur conduit alors la rame en CMC (Conduite Manuelle Contrôlée).

Par contre, dans les systèmes sans conducteur, le pilote automatique est redondant : en cas de panne, une commutation d'un pilote automatique à l'autre pilote est effectuée, et l'équipe de maintenance est alertée.

La liaison phonique entre les voyageurs et le PCC

Cette liaison est indispensable et utilise les mêmes canaux que l'échange d'informations véhicule \longleftrightarrow PCC.

La régulation de trafic

Ce n'est pas un problème particulier aux systèmes de transport automatique. La régulation de trafic est une fonction qui consiste à prendre les mesures nécessaires pour que l'exploitation reste la plus conforme possible à ce qui était initialement prévu (ce qui correspond à l'attente des voyageurs), en particulier un espacement régulier entre chaque train.

La régulation du trafic (qui est surtout importante pour les systèmes urbains à grande capacité) peut être faite : soit par le régulateur lui-même qui prend les décisions en fonction des informations qu'il possède (par les consoles ou le T.C.O. : Tableau de Contrôle Optique), soit par un ordinateur qui, après acquisition des informations, effectue le traitement de celles-ci, prend les décisions et lance les télécommandes correspondantes.

Suivant le type d'exploitation du système, les voyageurs seront sensibles à deux paramètres : les horaires des trains et/ou les intervalles entre trains.

.../

La régulation d'horaire concerne des écarts de faible amplitude par rapport à l'intervalle, de telle sorte que la correction se fait sur le seul train perturbé.

On agit alors sur la durée d'arrêt en station : si le train est en retard, cette durée est diminuée ; si le train est en avance, cette durée est augmentée.

On peut aussi, parfois, agir sur le temps de parcours de l'interstation : si le train est en retard, la consigne de vitesse est légèrement supérieure, etc....

Mais il est important de noter que certains systèmes, de par leur conception, ne permettent aucune modification de ce temps de parcours : les systèmes Westinghouse (Atlanta, B.A.R.T.,....), le Wedway, le C.T.M.....

On ne peut alors agir que sur le temps d'arrêt en station.

La régulation d'intervalle intervient lorsque les écarts sont tels qu'il n'est plus possible d'agir sur un seul train, mais sur tous les trains en exploitation : les horaires de toutes les autres rames sont décalés (en particulier les rames au départ des terminus). Cette régulation d'intervalle est d'autant plus importante que l'intervalle entre les trains est réduit.

Rappelons brièvement pourquoi la régulation du trafic est si importante : le stationnement d'une rame à quai pendant un temps plus long que prévu (pour une cause quelconque) crée un intervalle plus grand devant cette rame ; arrivée à la station suivante, elle devra embarquer un nombre plus élevé de voyageurs (risque de blocage de la fermeture des portes, augmentant à nouveau l'intervalle avec la rame précédente....). Pendant ce temps, des rames (qui auront alors peu de passagers à embarquer) s'accumuleront derrière la rame perturbatrice, provoquant un "bouchon".

La régulation du trafic a donc pour but d'empêcher l'enclenchement de ce "cercle vicieux".

Signalons enfin, dans ce chapitre sur la supervision, une particularité des systèmes automatiques : le réseau (stations) est surveillé par circuit vidéo interne, depuis le PCC.

CONCLUSION GENERALE

Dans cette conclusion, notre souhait est de tirer de l'étude précédente quelques réflexions concernant l'évolution future des transports automatiques guidés.

LA TECHNOLOGIE

. Dans les années 70, les concepteurs de systèmes automatiques (qui s'intéressaient beaucoup aux véhicules de petit gabarit) ont développé des systèmes à roulement sur pneus.

Aujourd'hui, on voit que le pneu n'est pas la panacée et que certains systèmes importants reviennent au roulement fer classique (TAU, UTDC).

. On va vers une informatisation de toutes les fonctions, en particulier des fonctions de sécurité.

Rappelons que les systèmes UTDC de Détroit et Vancouver seront les deux premiers systèmes où la sécurité est entièrement assurée par "Soft" (logiciel).

. On va également vers une diminution du volume des équipements au sol, tout en privilégiant une bonne communication véhicule \longleftrightarrow voie.

Les circuits de voie, classiques, sont progressivement abandonnés. Parallèlement, les véhicules deviennent "intelligents" : ils ont en mémoire de nombreuses informations et peuvent les traiter à bord.

. L'évolution des dispositifs anti-collision jusqu'aux dispositifs "à cantons mobiles déformables" permet une très bonne souplesse d'exploitation (en particulier des intervalles courts entre trains).

.../

. Pour faciliter la maintenance, les concepteurs utilisent aujourd'hui des composants de plus en plus fiables (emploi de balises passives....) ou des composants standards (OTIS).

Le système ARAMIS est même pourvu d'un dispositif spécial d'aide à la maintenance, qui permet l'élaboration rapide d'un diagnostic précis, en cas de panne.

. On peut penser qu'un des principaux intérêts des futurs systèmes consistera en leur multi-modalité. En effet, disposer de plusieurs modes possibles (voie unique temporaire, navette, mode normal, etc....), c'est pouvoir concilier contraintes d'exploitation et demande des voyageurs. Certains systèmes possèdent de bons atouts dans ce domaine : le procédé d'UTDC autorise la bidirectionnalité, sans qu'il soit nécessaire de rajouter du matériel ; le mode "voie unique temporaire" est donc facilement accessible.

. Notons enfin un certain nombre d'innovations technologiques dont il sera intéressant de suivre l'évolution :

- le radar à effet Doppler, pour mesurer la vitesse réelle (Maglev),
- l'accouplement immatériel : liaisons haute fréquence et ultra-sons (Aramis),
- la propulsion par courroies magnétiques (CTM), lévitation magnétique (Maglev et M-Bahn) ou sur coussins d'air (Otis).

LA QUALITE DE SERVICE

Dans les années 70, de nombreuses enquêtes avaient montré l'intérêt du public pour des systèmes à petits véhicules automatiques ; chaque véhicule allant directement, dans un réseau maillé, à la station choisie. Ce genre de systèmes, "à la demande", supprimait toute notion de correspondance (apportant au public la tranquillité recherchée), tout en permettant de réduire le temps d'attente en station puisque les intervalles entre véhicules étaient courts.

.../

En quelque sorte, ces systèmes offraient les avantages de la voiture, sans les inconvénients (feux rouges, encombrements....).

Beaucoup des recherches alors entreprises sont aujourd'hui abandonnées à cause du coût élevé de tels systèmes. En particulier, les véhicules à petit gabarit ont un poids très important par rapport au nombre de passagers transportés.

Le seul véritable système "à petits véhicules" en exploitation actuellement est celui de Boeing, à Morgantown, dont la licence a été rachetée par la firme japonaise KCV.

Le projet français ARAMIS, dont l'exploitation devrait commencer dans les prochaines années, montrera si le concept du transport "à petits véhicules et haute qualité de service" est viable économiquement.

La sécurité des voyageurs semble être un point très positif, puisque les systèmes à automatisme intégral n'ont encore provoqué aucun accident mortel depuis leur mise en service. Seules des blessures légères, dues en général à un freinage d'urgence, ont été recensées.

Les enquêtes montrent que les voyageurs se sentent en sécurité, malgré l'absence de conducteur, car ils ont confiance en la technologie employée. Cette impression est renforcée par le fait que la majorité des systèmes utilisent des portes palières.

La disponibilité obtenue par les différents systèmes est en général très satisfaisante.

Rappelons que la disponibilité est définie par le rapport :

$$D = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

où :

MTBF = temps moyen de bon fonctionnement (meantime between failure)

MTTR = temps moyen d'interruption (meantime to repair).

.../

La disponibilité des systèmes se stabilise en général au-dessus de 98% et souvent même de 99%.

Certains systèmes ont une "période de jeunesse" quelque peu difficile (AIRTRANS n'avait qu'une disponibilité de 56% la première année), alors que le VAL, par exemple, atteignait 98% dès sa première année de mise en service.

En tout état de cause, les transports automatiques ont une disponibilité au moins aussi bonne que celle des métros lourds.

LE POINT DE VUE DE L'EXPLOITANT

En marge de notre étude, il peut être intéressant de se poser la question suivante : les transports à automatisme intégral présentent-ils des avantages économiques par rapport aux autres transports à conduite manuelle ?

Il n'est pas question ici de faire une étude comparative exhaustive car les seuls chiffres dont nous disposons sont des coûts absolus de revient, sans base de comparaison avec des systèmes dont les conditions d'exploitation sont analogues.

Disons simplement que l'absence de personnel à bord entraîne indéniablement une baisse des coûts d'exploitation. Comme l'expérience du VAL tend à le montrer, l'époque est peut être révolue où le déficit constant des transports urbains constitue une "fatalité" que les pouvoirs publics ne peuvent que constater.

B I B L I O G R A P H I E

- . Compte rendu journée d'étude de l'AFCET "L'automatisation des métros - Les automatismes de conduite" - 1978
- . IDN - Cours de Y. DAVID "Evolution technologique dans les transports terrestres".
- . F.T. BARWELL "Automation and control in transport" - Pergamon Press - 1983
- . IFAC "Control in transportation systems" - Pergamon Press - 1983
- . UMTA "Innovation in public transportation" - 1980
- . UMTA "Assessment of operational AGT : Jetrail" - 1977
- . UMTA "Assessment of the Satellite Transit System (STS) at the Seattle-Tacoma International Airport" - 1977
- . UMTA "Assessment of the ACT System at Fairlane Town Center" - 1977
- . UMTA "Assessment of operational AGT : Airtrans (Phase I)" - 1976
- . UMTA "Assessment of operational AGT : Airtrans (Phase II)" - 1980
- . UMTA "Conference on AGT technology development" - 1978
- . UMTA "Assessment of the UMI type II tourister AGT system at King's Dominion" - 1977
- . UMTA "Assessment of the Passenger Shuttle System (PSS) at Tampa International Airport" - 1977
- . UMTA/IRT "Description of the VAL AGT system" - 1978
- . UMTA/SNC "Development investigation of cabintaxi/cabinlift system" - 1977
- . RATP "Pilotage automatique type P.A. 75-135 Hz"
- . "The Japan industrial and technological bulletin" n° 16 - 1983

- . MATRA "Description du Métro de Lille (VAL)" - 1978
- . MATRA "Description du système d'automatisme VAL à cantons fixes" - 1977
- . "Le système VAL appliqué au Métro de Lille" - D. FERBECK dans la Revue Générale des Chemins de Fer - mai 1981
- . "A green light for advanced train controls" - Paul S. KALRA dans I.E.E.E. February 1979
- . IRT-CRESTA "Les systèmes nouveaux de transport urbain en site propre au Japon" - Ph. PREVOT - Janvier 1985
- . UTDC "Intermediate capacity transit systems"
- . "Birmingham Maglev - automatic control and communication" - 1984
- . "World's first operation moves into the test phase" - W. JOHNSON et V. NENADOVIC dans Railway Gazette International - April 1983
- . "The here and now of advanced transit" dans Mass Transit - May 1984
- . "Portrait-robot d'un système d'un autre type" - B. FELIX - Travaux - Octobre 1983
- . MATRA "Description générale du système ARAMIS" - 1983
- . "Glossary of urban public transportation terms" - National Academy of Sciences - Washington D.C. - 1978
- . "The status, market perspectives and financing approaches for medium capacity automated transit systems" dans Journal of Advanced Transportation - 1985
- . IRT-CRESTA "Evolution et perspectives de l'automatisme dans les transports publics" - Y. DAVID - Conférence APEC - 1984
- . "Poma 2000 : Systèmes de transports urbains à traction par câble" - J. GAYOT et J.P. MOLLARD - Travaux - Octobre 1983
- . "Poma 2000 : Description" - Société POMA 2000
- . "Westinghouse people mover : the standard of excellence" - John R. TUCKER

- . UMTA "Assessment of the wedway peplemover system at Walt Disney World" - 1977
- . IRT-CRESTA "Le système H-Bahn de l'Université de Dortmund"-Y. DAVID-1985
- . "MagnetBahn GmbH : Description"
- . "Defining limits to metro automation" - Klaus PIERICK dans Railway Gazette International - 1984
- . "Students suspended in H-Bahn demonstration" - Railway Gazette International - 1983
- . UMTA " C-Bahn : peplemover profile" - Demag + MBB
- . "Victoria line signalling principles" - V.H. SMITH - 1966
- . "US peplemovers : an update" - Mass Transit - March 1985
- . "Les nouveaux transports urbains" - B. FELIX - Recherche - 1980
- . RATP "Automatiser : pour quoi faire ?" - Entre les Lignes
- . "Development status of AGT systems in Europe and Japan" - IEEE - 1980
- . "Europe-Japon-USA-Canada : systèmes automatiques guidés urbains" - TEC n° 45 et 49 - 1981
- . SODETEG-TAI "Régulation de lignes de métro"
- . SODETEG-TAI "Commande centralisée des métros et des transports urbains guidés" - 1982
- . ALSTHOM-ATLANTIQUE "Automatisation des métros : conception et principes actuels" - 1983
- . SODETEG-TAI "Présentation des techniques utilisées pour l'automatisation des chemins de fer métropolitains" - M. TESSERAUD
- . RATP "Les systèmes automatiques de transports de Morgantown, Dallas, Atlanta, Kingston, Kobe, Osaka" - Compte rendu de mission - 1981
- . International Transit Compendium "Automated guideway transit" (Vol.IV - n° 1) - 1983