

INSTITUT INDUSTRIEL DU NORD

Option "TRANSPORT"

Module : TRANSPORT & TECHNOLOGIES AVANCEES

2760

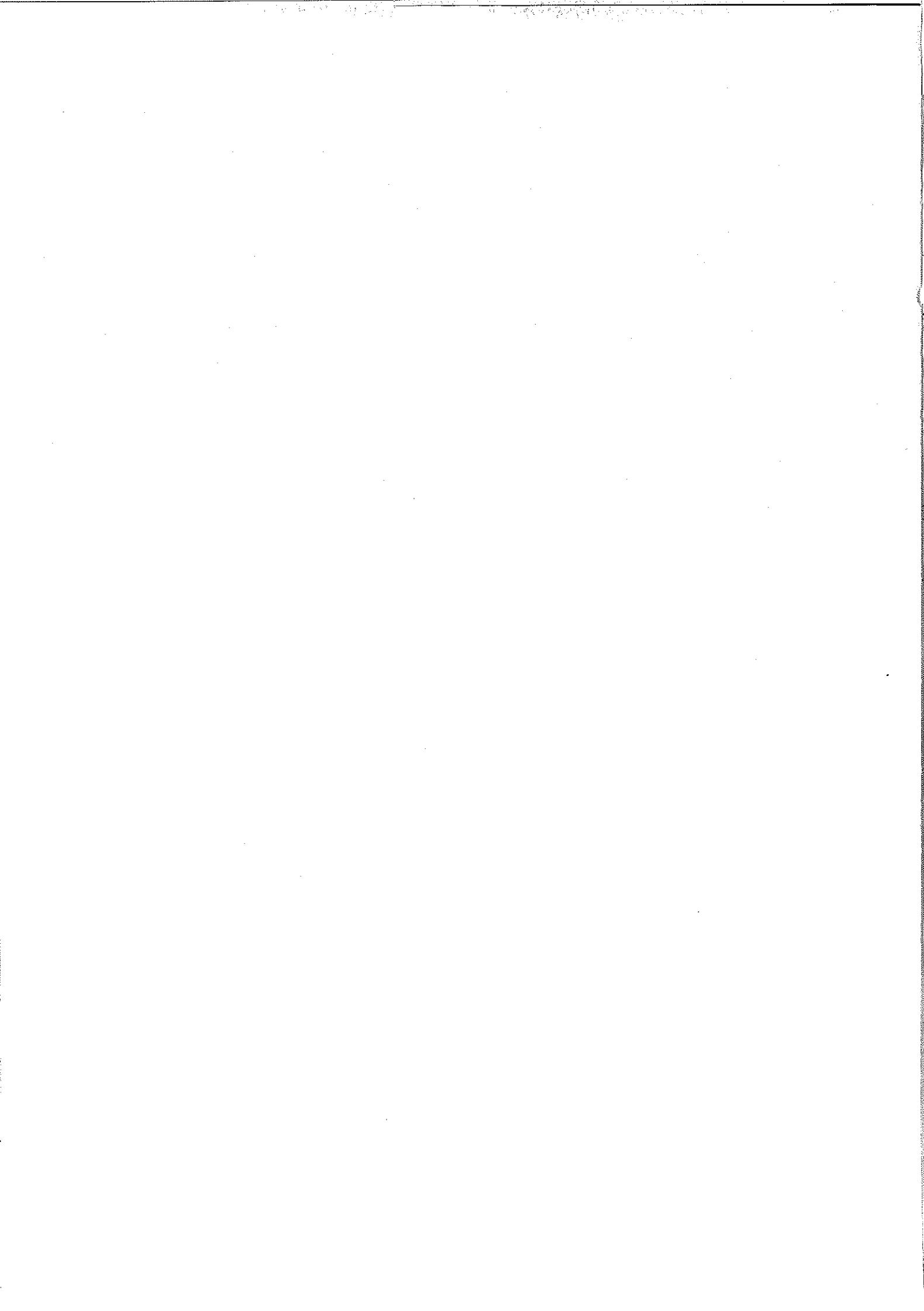
LES TECHNOLOGIES DES SYSTEMES
D'EXPLOITATION DE LA CIRCULATION

par Y. DAVID

INRETS -CRESTA

Edition 1985

Septembre 1985 - 194



TECHNOLOGIE DES SYSTEMES D'EXPLOITATION DE LA CIRCULATION

I - Conception générale des systèmes de régulation du trafic

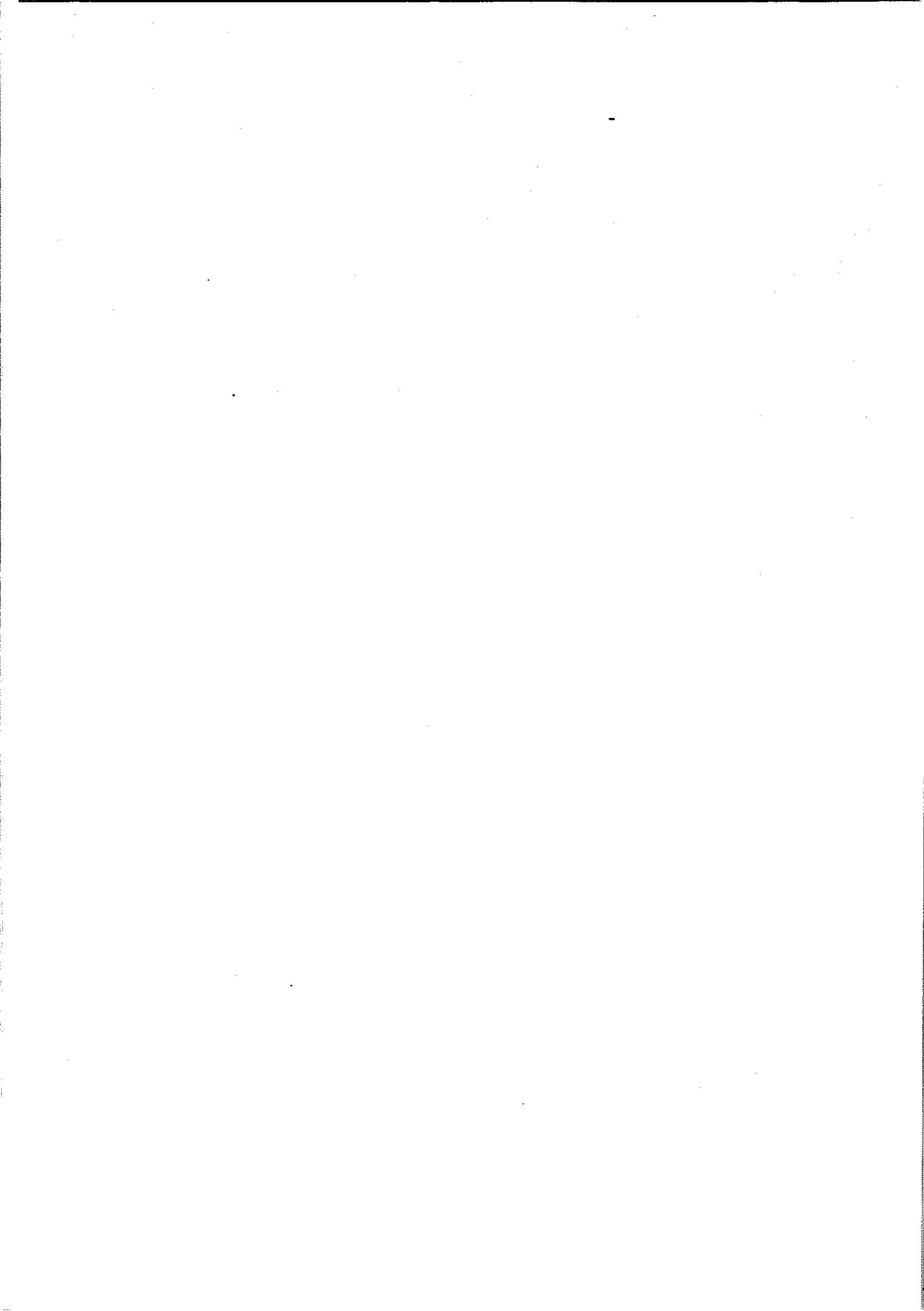
II - Les capteurs

III - Les transmissions

IV - Signalisation et communication avec les conducteurs

ANNEXE







I - CONCEPTION GENERALE DES SYSTEMES DE REGULATION DU TRAFIC

1. INTRODUCTION

La notion d'exploitation du trafic est une notion relativement nouvelle. Jusqu'au siècle dernier en effet, la vitesse des transports terrestres était telle que l'on pouvait, sans risques de grandes catastrophes, laisser les véhicules circuler sans contrainte sur leur infrastructure.

La nécessité de contrôler le mouvement des véhicules, de créer des interfaces entre infrastructure et conducteurs, est née avec l'apparition de la motorisation et avec l'augmentation des vitesses qui en est résultée, les risques d'accidents devenant plus graves.

Les premières opérations d'exploitation dans les transports terrestres (comme d'ailleurs dans les autres modes de transport) ont eu pour objectif essentiel la sécurité. Au départ, elles étaient très localisées, et mettaient en jeu des équipements de signalisation mécaniques, de type "sémaphores" à commande manuelle destinés :

- soit à protéger des croisements :
 - . croisements de voies au niveau des postes d'aiguillage
 - . carrefours routiers
- soit à éviter les collisions en file sur des voies de chemin de fer.

Ces équipements se sont ensuite modernisés avec les progrès de la technique, et l'on a vu apparaître par exemple :

- des postes d'aiguillages à relais permettant de télécommander les mouvements d'aiguilles et la signalisation correspondante,
- des armoires automatiques de commande de feux de carrefours,
- des circuits de voies permettant une détection automatique des trains, et le déclenchement automatique de la signalisation de protection contre les collisions.

Avec le développement des transports depuis les années 50, et l'apparition de plus en plus fréquente de phénomènes de congestion, on a commencé à se préoccuper d'utiliser les techniques d'exploitation pour améliorer la fluidité du trafic et essayer de tirer le meilleur parti des infrastructures existantes.

On a été ainsi amenés à commander, à partir de postes centralisés, de véritables systèmes de transport constitués par une infrastructure donnée et l'ensemble des véhicules qui y circulent. Cette évolution a bien entendu été facilitée par le développement de l'électronique et de l'informatique.

De tels systèmes comportent en général un poste central (PC) qui reçoit des informations sur la position des véhicules et l'état général du trafic recueillies à l'aide de capteurs.

Ces informations sont traitées par un ordinateur situé dans le PC qui élabore en retour des commandes qui sont adressées aux véhicules, conformément au schéma de la fig. 1.

Dans les systèmes entièrement automatiques - du type VAL par exemple - ces commandes sont transmises directement sous forme de signaux électriques codés aux organes intéressés du véhicule, tels que les moteurs ou les dispositifs de commande de portes.

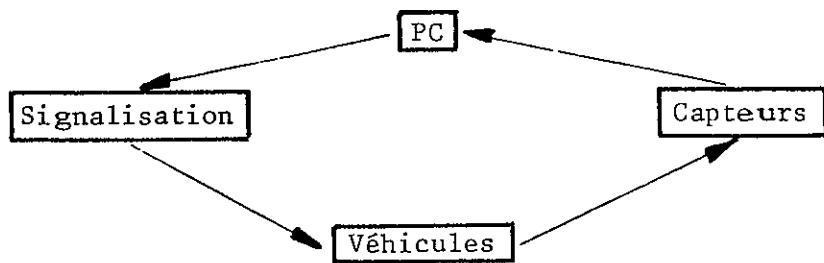


Fig. 1 : Schéma synoptique d'un système de régulation

Dans la plupart des systèmes de transport cependant, l'homme joue encore un grand rôle dans la conduite de véhicules, et les commandes lui sont transmises par l'intermédiaire de dispositifs de transmission et de signalisation appropriés.

Nous allons présenter dans ce 1er chapitre la conception générale des systèmes existants dans les domaines routier et ferroviaire.

Nous aborderons ensuite dans les chapitres suivants les 3 éléments essentiels d'une chaîne de régulation :

- les capteurs,
- les transmissions entre les divers sous-ensembles de la fig. 1,
- la signalisation constituant l'interface entre les automatismes et le conducteur.

... /

2. GENERALITES SUR LES SYSTEMES D'EXPLOITATION DANS LES TRANSPORTS TERRESTRES

2.1. - Objectifs de l'automatisation de l'exploitation dans les transports

Nous avons vu que les 2 principaux objectifs assignés à l'exploitation dans les transports étaient au départ la sécurité et la fluidité du trafic. Peu à peu, on a cependant été amenés à spécifier de nombreux autres objectifs qui justifient les développements de l'automatisation dans le domaine, et que l'on peut classer ainsi :

- Meilleure qualité de service pour l'usager :
 - . sécurité,
 - . fluidité du trafic,
 - . régularité,
 - . confort
- Réduction des coûts d'exploitation :
 - . meilleure utilisation des infrastructures de transport,
 - . meilleure utilisation du personnel,
 - . amélioration de la maintenance
- Autres objectifs possibles :
 - . objectifs liés à la protection de l'environnement : réduction du bruit, de la pollution,
 - . réduction de la consommation d'énergie des transports.

Ces objectifs ne sont pas tous compatibles entre eux, et la recherche des stratégies d'exploitation doit souvent tenir compte de compromis entre ces objectifs.

... /

2.2. - Situation comparative du trafic routier et du trafic ferroviaire vis-à-vis des automatismes

2.2.1. - Le trafic routier est caractérisé par :

- . la présence de conducteurs non professionnels
- . une circulation sur 2 dimensions
- . la grande étendue géographique du réseau
- . le circulation de véhicules privés sur une infrastructure publique.

Ces caractéristiques rendent difficiles l'automatisation de l'exploitation du réseau routier, et en particulier les liaisons voie ↔ véhicules.

Les conséquences en sont que :

- . la conduite des véhicules est, et restera encore longtemps, manuelle,
- . les aides à la conduite sont pratiquement inexistantes et sont longues à se développer,
- . l'exploitation porte sur une régulation de flux de trafic et non de véhicules isolés.

2.2.2. - Le trafic ferroviaire est caractérisé au contraire par :

- . une circulation sur une dimension
- . des conducteurs professionnels
- . la gestion des voies et des véhicules par une même autorité.

Il en résulte que l'automatisation de la régulation est plus facile à réaliser que dans le domaine routier et fait davantage appel à des liaisons voie ↔ véhicules.

.../

3. LES SYSTEMES DE REGULATION DU TRAFIC ROUTIER

Nous n'aborderons que très brièvement ce domaine du trafic routier qui est traité dans d'autre cours de l'option "Transport".

3.1. - Régulation du trafic urbain

C'est dans les villes que les difficultés de circulation sont apparues le plus vite - pratiquement dès les premiers développements de l'automobile - et c'est pour les réseaux urbains que les premiers systèmes de régulation du trafic ont été utilisés.

Comme cela a été indiqué en introduction, leurs objectifs ont évolué dans le temps :

- . à l'origine, il s'agissait uniquement d'un objectif de sécurité, de protection des véhicules contre les collisions aux carrefours ;
- . ces dernières décennies, avec le développement des phénomènes de congestion dans les villes, les systèmes de régulation ont également pour objectif d'améliorer la fluidité du trafic.

Les stratégies ont beaucoup évolué depuis l'origine, et l'on est passé successivement par les étapes suivantes :

- . programmes fixes de commande de feux isolés,
- . commande adaptative de feux de carrefours,
- . programmes fixes de coordination d'itinéraires,
- . programmes fixes de coordination de réseaux : méthodes TRANSYT, THESEE, THEBES,
- . plus récemment, commande de feux sur des réseaux en temps réel :
 - méthode SCOOT britannique
 - méthode PRODYN à l'étude en France.

Nous dirons ici un mot de ces stratégies de régulation de réseaux urbains.

.../

3.1.1. - Principe de programmes de calcul de plans fixes de coordination de feux sur des réseaux.

Les programmes, tels que TRANSYT ou THESEE, mettent en jeu une combinaison de simulations et d'optimisations successives qui permettent d'arriver par approximations successives à un plan de feux optimal.

Rappelons qu'un plan de feux peut être caractérisé par les paramètres suivants :

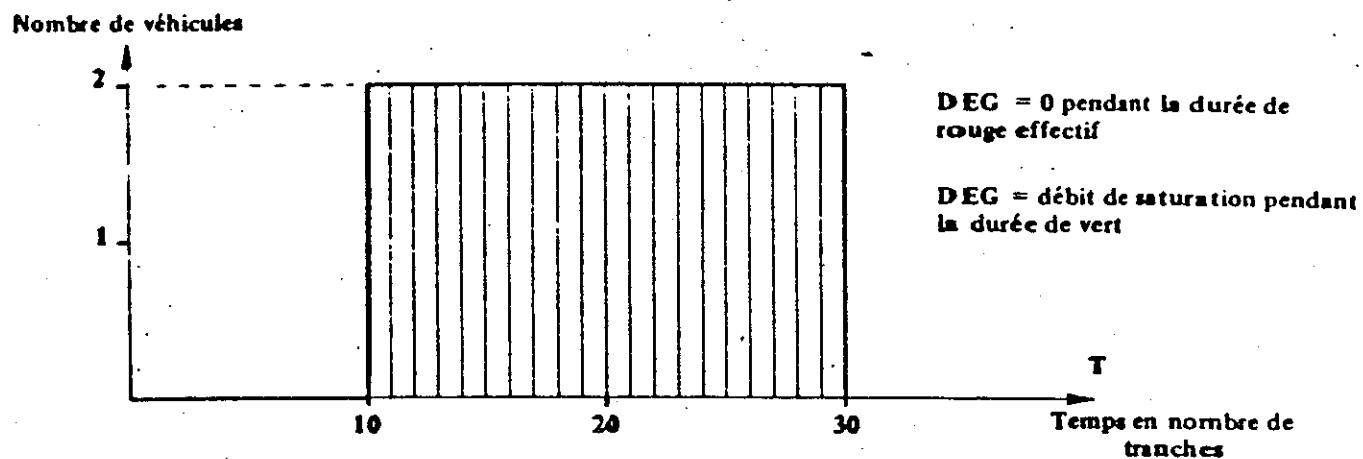
- une durée de cycle qui est en général la même pour tous les carrefours du réseau,
- les durées de phases - verts et rouges - aux différents carrefours,
- les "décalages" caractérisant la coordination des carrefours les uns par rapport aux autres, et qui sont représentés par un tableau donnant, par rapport à un instant origine arbitraire dans le cycle, le début d'une phase déterminée de chacun des carrefours.

Les programmes de calcul de plans de coordination consistent :

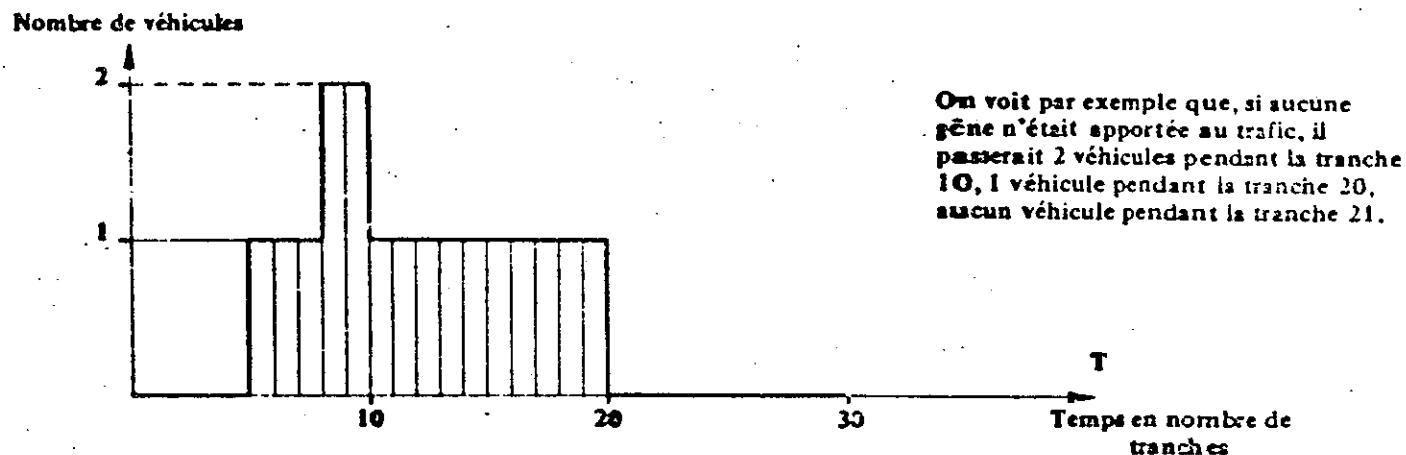
- à se donner un plan de feux arbitraire,
- à procéder à une simulation du trafic sur le réseau et avec ce plan de feux à l'aide d'un modèle simplifié qui permet d'évaluer un critère tenant compte du temps perdu par les véhicules aux carrefours à feux et leur nombre d'arrêts,
- à modifier successivement par petits incrémentés les différents paramètres caractérisant le plan de feux - durée de phases, décalages - et à évaluer par simulation l'effet de ces modifications jusqu'à ce que l'on arrive à un optimum du critère. Afin d'éviter de s'arrêter sur un optimum local, le programme teste également systématiquement l'effet de variations importantes choisies de façon aléatoire, sur ces paramètres.

Le modèle de simulation est fondé sur une représentation du trafic par des histogrammes figurant le nombre de véhicules arrivant, partant, ou attendant à un carrefour par tranche de temps élémentaire (de l'ordre de 1 à 2 sec.) (cf. fig. 2).

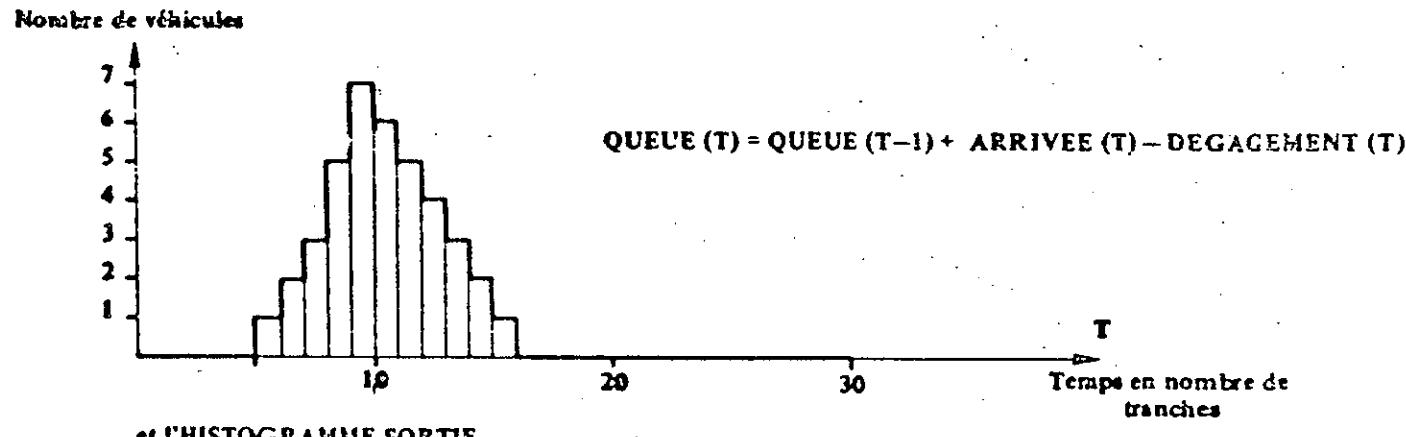
L'HISTOGRAMME DEGAGEMENT est le suivant :



Supposons que l'HISTOGRAMME ARRIVEE soit le suivant :



Ces deux histogrammes permettent de reconstituer : l'HISTOGRAMME QUEUE



et l'HISTOGRAMME SORTIE

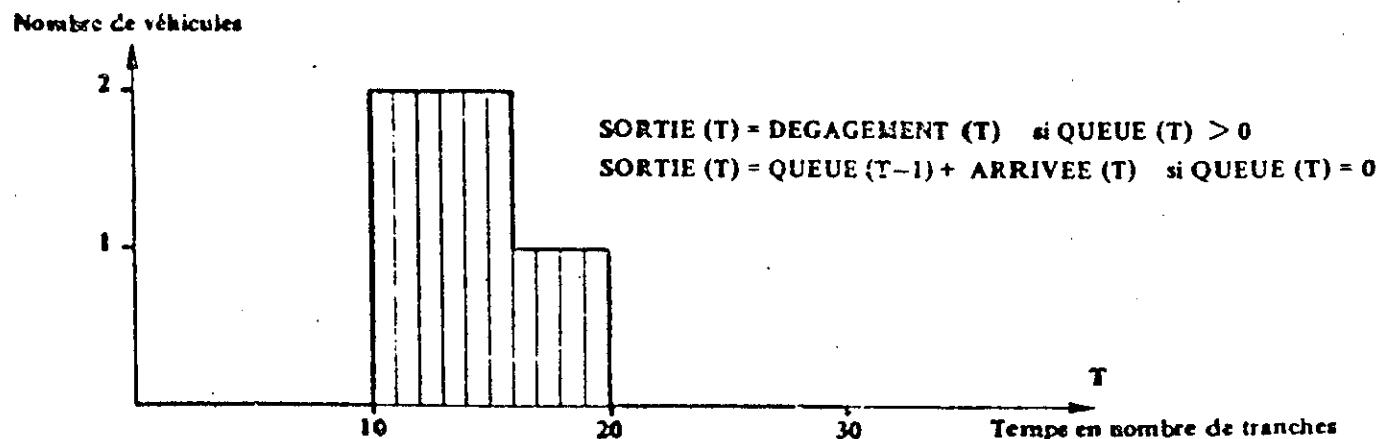


Fig. 2. (extraite de la brochure du SETRA sur THESEE)

3.1.2. - Principes de SCOOT

Le programme SCOOT de calcul de feux en temps réel mis au point au T.R.R.L. procède selon la démarche suivante (fig. 3) :

- Un détecteur, situé en amont de chaque carrefour sur chacune de ses branches, élabore des histogrammes d'arrivée de véhicules. On en déduit un diagramme du flux cyclique ("current cyclic flow profile").
- Prédiction des queues se formant au carrefour à partir de ce diagramme.
- Optimisation par zones : ayant établi les histogrammes de queues aux carrefours, il est possible de procéder, en temps réel, à des optimisations sur de petites zones à l'aide d'un programme de type TRANSYT, ces optimisations consistant, à partir d'un plan fixe donné, à y introduire de petites altérations à chaque cycle en modifiant successivement :
 - . les durées de vert,
 - . les décalages entre carrefours voisins,
 - . le cycle.

Notons que des essais faits à GLASGOW et COVENTRY ont montré que l'on obtenait des gains de l'ordre de 12% par rapport à un plan fixe.

3.1.3. - Programme PRODYN

Le programme PRODYN de calcul des feux en temps réel a été conçu au CERT-DERA. Il repose sur le principe de la programmation dynamique ou principe de Bellman.

.../

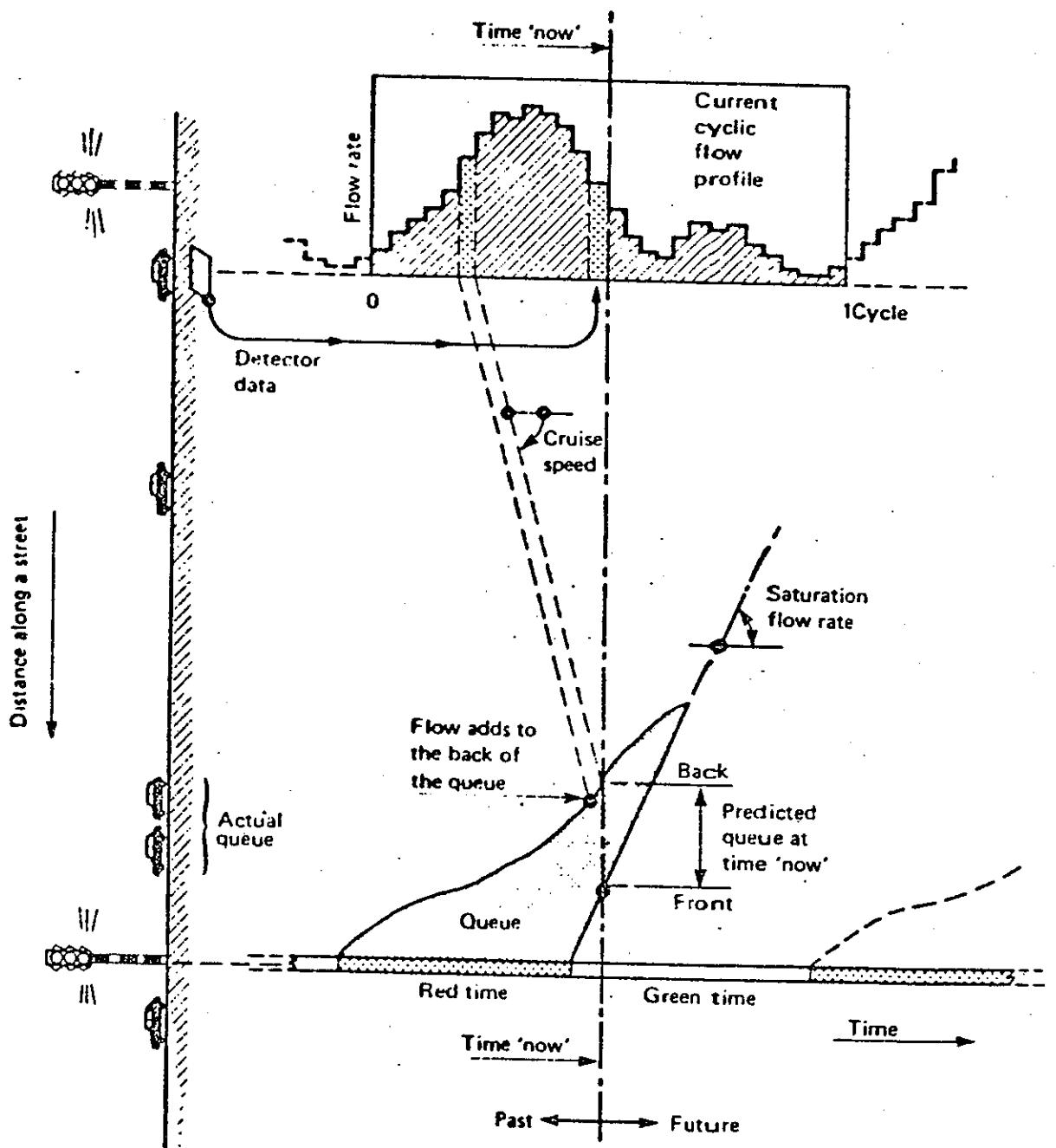


Fig. 3 – Principles of the SCOOT traffic model

(extrait d'une brochure du T.R.R.L.)

3.2. - Régulation d'autoroutes

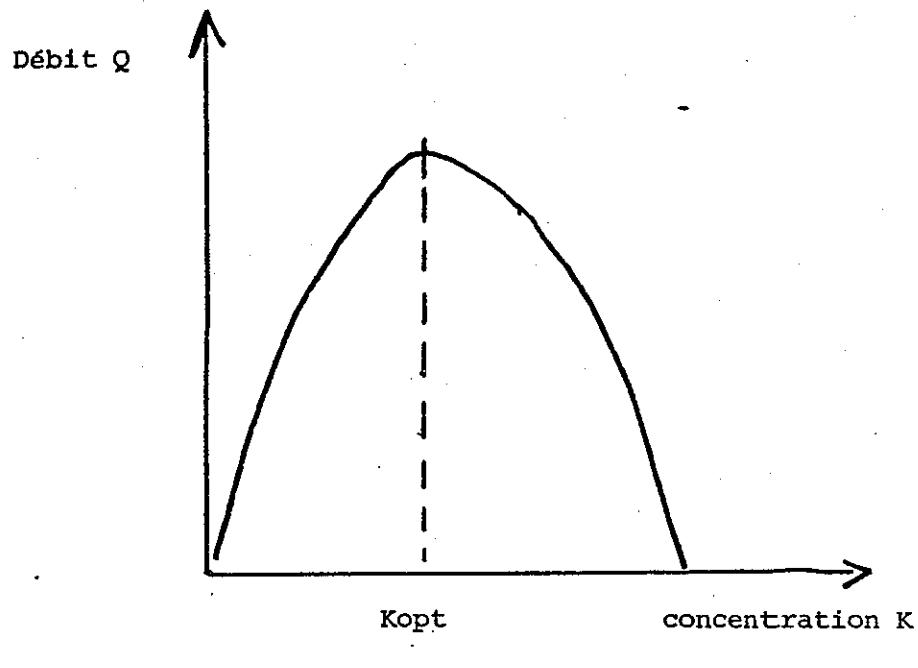
Les autoroutes ont été conçues à l'origine pour éviter les conflits qui se produisent sur les réseaux routiers classiques, et pour que le trafic puisse s'y écouler de façon libre et sans contrainte, sans nécessiter d'intervention particulière. On peut se demander par conséquent pourquoi il est nécessaire de procéder à une régulation du trafic sur ces infrastructures. En fait, l'expérience quotidienne montre que, particulièrement dans les régions urbaines à grande densité de trafic, la circulation sur les autoroutes est soumise à de fortes perturbations, ce qui réduit considérablement le rendement de ces voies.

Ces perturbations sont dues essentiellement à deux grandes causes :

- des restrictions géométriques de capacité, telles que des rétrécissement ou des pentes à fort gradient ;
- des restrictions temporaires dues :
 - . à des travaux,
 - . à des incidents ou des accidents,
 - . à une répartition non homogène des flots de circulation,
 - . enfin à la saturation de la chaussée, qui peut produire des baisses très sensibles du débit et même réduire celui-ci à zéro.

Ce dernier phénomène s'explique par la loi fondamentale de l'écoulement du trafic, qui est représentée sur le graphique de la figure 4 illustrant les variations du débit d'une chaussée en fonction de la concentration des véhicules.

On voit que lorsque la concentration dépasse une certaine valeur (K_{opt} correspondant à une valeur maximale du débit), on se trouve dans une zone d'instabilité de trafic, et le débit décroît progressivement pour s'annuler pour une valeur K_s de la concentration correspondant à la saturation.



Relation débit - concentration

Fig. 4

C'est aux Etats-Unis, où l'on rencontre de véritables réseaux d'autoroutes au voisinage des grandes villes, que les phénomènes de congestion de trafic sur ces autoroutes ont été étudiés pour la première fois dans les années 1960, et les Américains ont mis peu à peu au point des méthodes permettant de lutter contre cette congestion.

Le principe de ces méthodes consiste à essayer de maintenir en tout point de l'autoroute la concentration du trafic au-dessous du seuil pour lequel le trafic cesse d'être fluide et stable. Il faut pour cela régler le débit en amont des points où une congestion risque de se produire :

- soit en retenant quelques temps ou en ralentissant les véhicules,
- soit en dirigeant les véhicules vers un autre itinéraire routier ou autoroutier moins chargé.

Les moyens de commande dont on dispose pour répondre à ces besoins sont résumés figure 5.

PRINCIPE DE LA REGULATION DU TRAFIC SUR UN ENSEMBLE AUTOROUTIER

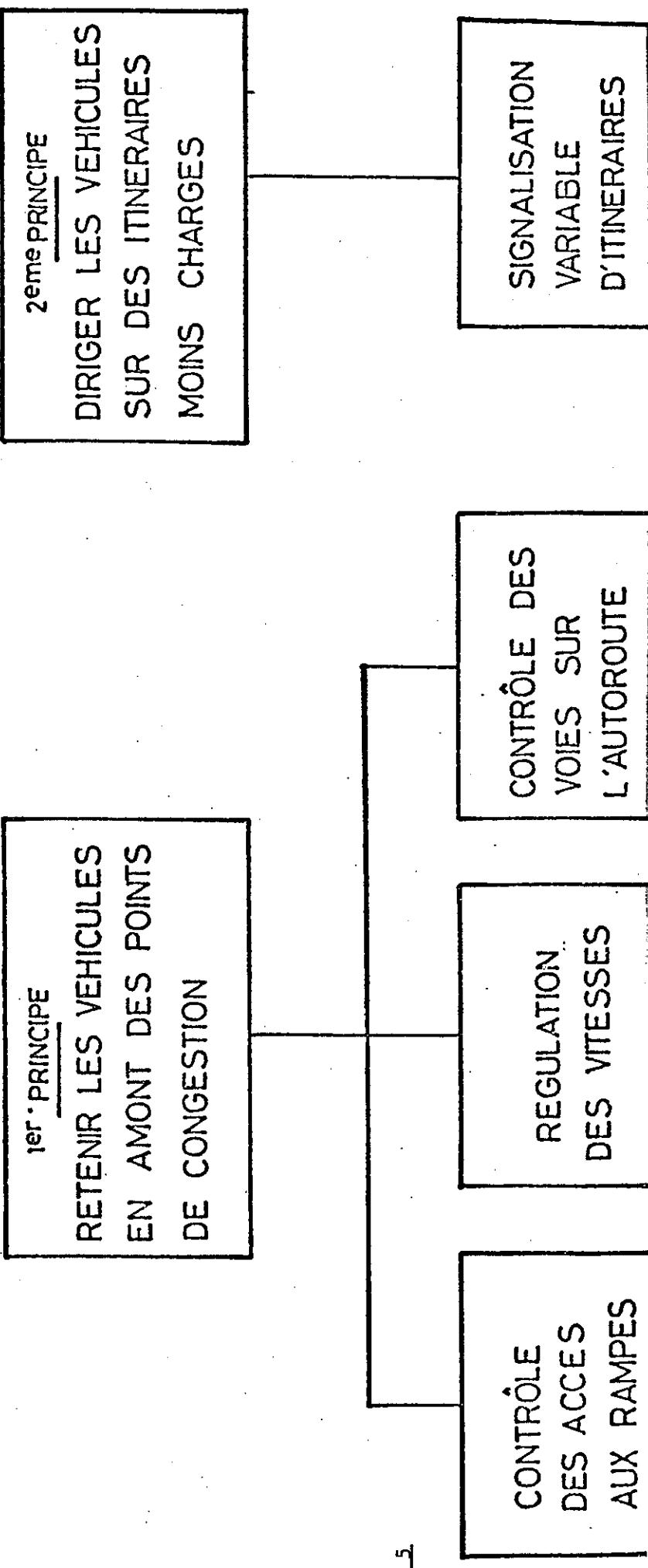


Fig. 5

Un élément important de la régulation des autoroutes est la détection automatique d'incident (D.A.I.).

Il existe de nombreuses méthodes de D.A.I. - Citons par exemple :

Modèle Californien (taux d'occupation)

C'est la méthode la plus répandue. Elle repose sur une comparaison des taux d'occupation dans l'espace, entre 2 stations de mesure 1 et 2 adjacentes, et dans le temps entre 2 instants successifs. Un incident est déclaré si l'on a simultanément :

$$TO_1(t) - TO_2(t) \geq K_1$$

$$\frac{TO_1(t) - TO_2(t)}{TO_1(t)} \geq K_2$$

$$\frac{TO_2(t-to) - TO_2(t)}{TO_2(t-to)} \geq K_3$$

(1) = amont

(2) = aval

Modèles de vitesse

Comparaison d'une vitesse lissée à un seuil

Modèles de densité

Mesures de densité sur boucles longues

Modèle Hollandais

Fondé sur une combinaison linéaire de la vitesse, du débit et du T.O.

.../

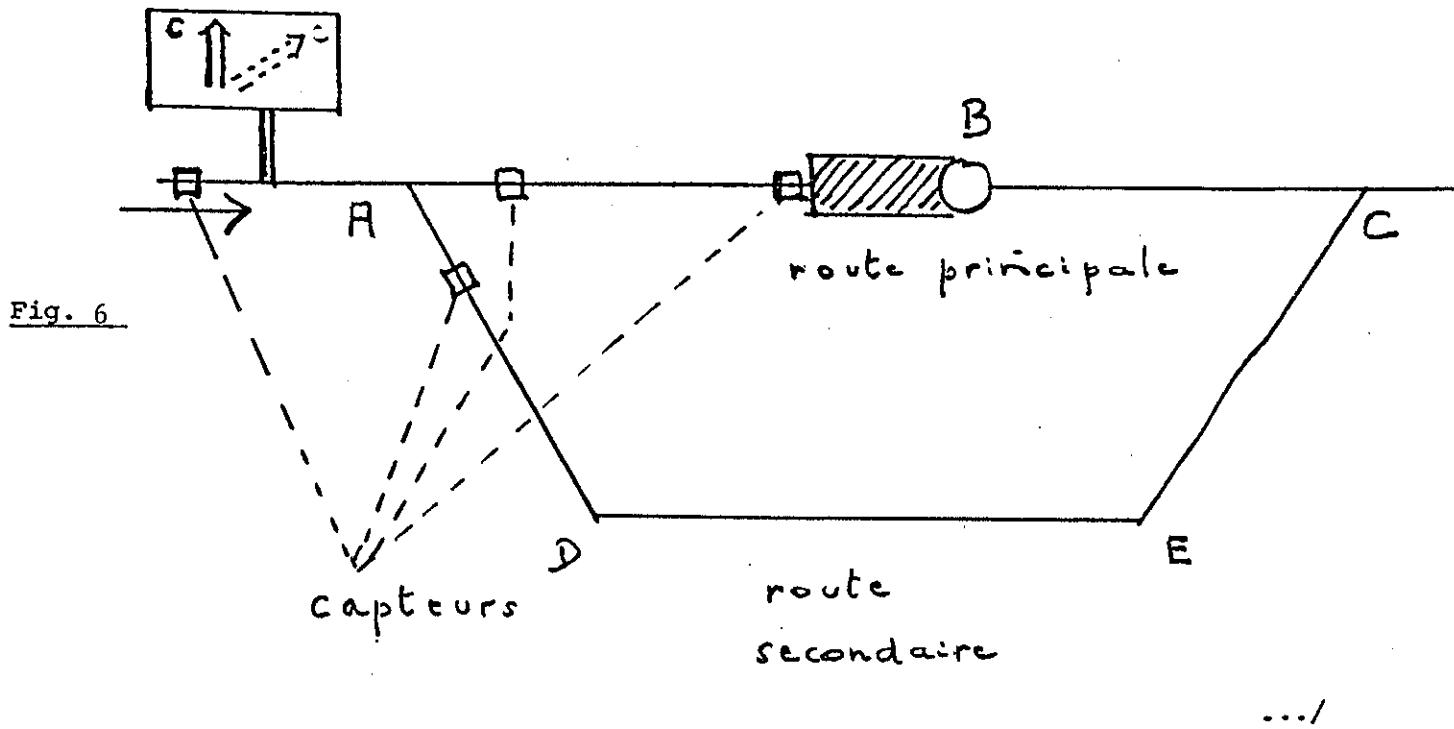
4 - LES OPERATIONS DE DELESTAGE

Sur de nombreux réseaux routiers ou autoroutiers, la capacité de certaines routes est insuffisante aux périodes de très fortes pointes, correspondant par exemple aux départs de vacances ou de longs week-ends. Ces périodes sont cependant trop rares pour justifier la construction d'infrastructures nouvelles qui seraient sous utilisées la plupart du temps.

Une solution envisageable consiste, durant ces périodes de pointe, à obtenir une meilleure distribution du trafic sur la totalité de la capacité disponible, en encourageant les conducteurs à délester les routes principales et à emprunter des itinéraires secondaires.

De tels délestages peuvent se faire de façon manuelle, mais il en existe actuellement plusieurs à commande automatique.

Le principe d'un délestage est le suivant (cf. fig. 6) :



Souvent sur une route principale A B C, il apparaît une zone de congestion en B, due à une restriction locale de capacité. Des queues se forment dans cette zone, et les temps de trajet sur A B C augmentent et deviennent plus grands que sur l'itinéraire secondaire A D E C.

Si une partie de la demande en A est délestée sur le trajet A D E C, il est possible de réduire la congestion en B, et de réduire les temps de trajets globaux sur le parcours A C.

L'opération consiste :

- à mesurer la demande en A, ainsi que les flux empruntant les itinéraires A B C et A D E C ;
- à mesurer les longueurs de queues se formant en B ;
- à évaluer, à l'aide d'un modèle simple, le temps de trajet sur A B C ;
- à initialiser le délestage, à l'aide d'un panneau variable dès que :

$$T_{\text{parcouru}} \quad \text{A D E C} \quad \leq \quad T_{\text{parcouru}} \quad \text{A B C}$$

sous réserve que A D E C reste fluide

Les premières opérations de délestage françaises datent de 1970-71 (opérations "Bourgogne" puis "Languedoc-Roussillon").

Il existe actuellement une douzaine de délestages en fonction sur le réseau français :

Ex : Brest

La Roche Bernard

Argenton s/Creuse

... /

5 - AUTOMATISATION DES SYSTEMES FERROVIAIRES

5.1. - Situations respectives des métros et du réseau ferroviaire SNCF vis-à-vis de l'automatisation

Les métros se caractérisent par les points suivants :

- lignes courtes,
- sites très protégés,
- matériels homogènes.

Il en résulte des possibilités d'automatisation étendue, voire intégrale, comme le montre l'exemple du VAL.

A la SNCF, on trouve des caractéristiques très différentes :

- réseau très long,
- sites moins protégés,
- matériels hétérogènes :
 - . express,
 - . omnibus,
 - . trains de marchandises,
- problèmes combinatoires complexes.

Il en résulte que l'automatisation se développe de façon plus prudente et progressive.

5.2. - Automatisation de l'exploitation à la SNCF

Comme nous venons de le voir, cette automatisation est caractérisée :

- par une démarche prudente et progressive,
- par le rôle important laissé à l'homme.

.../

5.2.1. - Les grandes fonctions de l'exploitation à la SNCF

L'organisation de la circulation à la SNCF repose sur les grandes fonctions suivantes :

- . la conduite des trains confiée aux mécaniciens,
- . la protection des trains contre les dangers de collision de survitesse qui est assurée par les mécaniciens dans le cadre de leurs fonctions de conduite, mais met en jeu des installations de détection et de signalisation au sol,
- . la formation des itinéraires confiée à des aiguilleurs situés dans des postes d'aiguillage,
- . la régulation du trafic, assurée par des régulateurs à partir de PC de régulation.

5.2.2. - La conduite des trains

La conduite des trains est confiée à des mécaniciens qui ont pour fonctions :

- d'une part d'assurer le respect de l'horaire qui leur est assigné,
- d'autre part, d'assurer la sécurité de leur train en respectant la signalisation affichée sur la voie.

Ces fonctions restent encore entièrement manuelles sur la plus grande partie du parc SNCF.

Toutefois, des automatismes commencent à apparaître sur quelques lignes :

- Dispositifs de conduite assistée affichant en permanence devant le conducteur, la différence entre son horaire théorique - déduit d'une mesure de la distance parcourue par comptage de tours de roues - et l'heure réelle donnée par une horloge électronique.

- Dispositifs de conduite programmée appliqués sur des automatismes de la banlieue Sud-Ouest de Paris : Il s'agit d'un petit calculateur de bord qui est chargé de gérer les différentes phases d'un programme de conduite entre 2 arrêts, à savoir :

- desserrage des freins et accélération à un taux déterminé,
- circulation à la vitesse limite autorisée,
- suppression de l'effort de traction et marche sur l'erre,
- freinage suivant une loi vitesse/espace donnée, déclenché par une balise spéciale, et permettant un arrêt précis à quai.

Le rôle du conducteur se limite à sélectionner, au moyen d'un cadran, le programme de marche à appliquer, et afficher l'heure d'arrivée : le calculateur évalue automatiquement le point de passage en marche sur l'erre.

5.2.3. - La sécurité

La protection contre les collisions et contre les risques de survitesse est assurée par la signalisation.

5.2.3.1. - Principe de la protection anti-collision :

La protection anti-collision repose en règle générale dans les réseaux ferroviaires sur le principe du cantonnement. La voie est divisée en tronçons longitudinaux ou "cantons", et l'on astreint les trains à ne jamais pénétrer dans un canton déjà occupé par un autre train.

Cette protection implique :

- une détection de la présence des trains dans les cantons, assurée grâce à des "circuit de voie" qui sont décrits plus en détail au chapitre suivant,
- une signalisation appropriée indiquant aux conducteurs si la voie est libre ou non devant eux.

On distingue de nombreux types de signalisation suivant les configurations de feux utilisées (cf. chapitre IV).

La plus courante est une signalisation dite à 3 aspects (rouge, jaune, vert), qui est celle du bloc automatique lumineux (B.A.L.) SNCF, et dont la signification est la suivante :

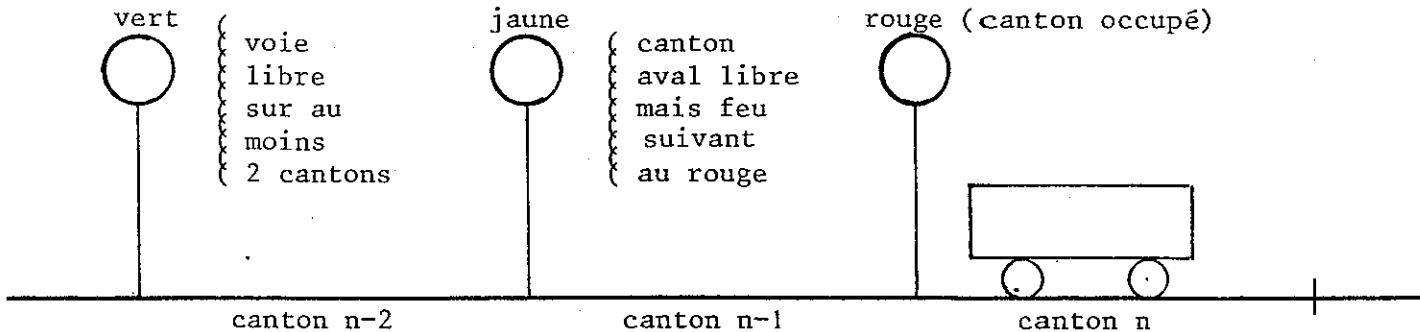


Fig. 7 - Bloc automatique lumineux

Cependant, on rencontre d'autres configurations de signalisation :

- signalisation 2 aspects (rouge - vert) avec canton "tampon" de la RATP,
- signalisation 4 aspects sur les voies où circulent des trains à grande vitesse.

5.2.3.2. - Protection anti-survitesse

Cette protection est assurée en général par des panneaux indiquant la vitesse limite à ne pas dépasser (cf. chapitre 4).

5.2.3.3. - Conduite manuelle contrôlée

Sur de nombreuses lignes ferroviaires, la sécurité des trains repose encore uniquement sur le conducteur dont une des obligations essentielles est le respect de la signalisation :

- une 1^{ère} précaution prise par la plupart des sociétés d'exploitation est de s'assurer que les conducteurs sont bien en état de conduire grâce à un dispositif appelé communément "homme-mort", ou plus scientifiquement VACMA (Veille automatique en conduite manuelle), consistant à imposer au conducteur, à intervalles réguliers de l'ordre d'une minute, une action consistant à agir sur un contact situé sur ou au voisinage de ses manettes de commande ;

- une autre précaution consiste à disposer sur la voie au droit des signaux un dispositif simple permettant de transmettre vers la motrice l'état de la signalisation.

ex : - système allemand "INDUSI" (cf. chapitre IV)
- "crocodiles" de la SNCF (!).

Le franchissement d'un signal au rouge ou le non respect d'une limite de vitesse se traduit automatiquement par un freinage d'urgence appliqué de façon automatique.

5.2.3.4. - Signalisation en cabine

Sur les trains à grande vitesse, on peut craindre que les conducteurs aient des difficultés à percevoir la signalisation extérieure.

C'est pourquoi ces trains sont en général équipés d'une signalisation en cabine ou "cab-signal" qui permet de recevoir sur le pupitre de commande toutes les informations concernant l'occupation des voies et les vitesses à respecter.

La conduite reste manuelle, mais ces systèmes permettent d'exercer une surveillance continue sur la façon dont le conducteur obéit à la signalisation et de déclencher :

- soit un signal d'alerte
- soit un freinage d'urgence

si les consignes ne sont pas respectées. /

(1) Les crocodiles sont les pièces métalliques dentelées que l'on aperçoit sur les voies de chemin de fer au voisinage de certains signaux. Leur état - de type tout-ou rien - est détecté par un frotteur situé sous la locomotive.

5.2.4. - La formation des itinéraires

Cette fonction, assurée grâce à des aiguillages, a beaucoup évolué en un siècle.

Au départ, les aiguilles et la signalisation de protection correspondante étaient manoeuvrées sur place à l'aide de leviers et de transmissions mécaniques. Puis les commandes mécaniques de plusieurs aiguilles voisines ont été regroupées dans un même local, appelé poste d'aiguillage. Des protections mécaniques, appelées "enclenchements" étaient prévues sur chaque ensemble de leviers afin d'interdire des combinaisons de commandes dangereuses.

L'étape suivante a consisté à manoeuvrer les aiguilles par des moteurs électriques télécommandés par des relais situés dans le poste d'aiguillage.

Dans un premier temps, on continuait à associer à chaque aiguille un levier de commande spécifique ; cependant, les systèmes à relais permettant facilement de commander simultanément une combinaison d'aiguilles, on est arrivé rapidement dans de nouveaux postes d'aiguillages baptisés "postes à pouvoir", puis "postes tous relais", à la notion de commande d'itinéraire, consistant à donner à un aiguilleur la possibilité de télécommander, par action sur un seul levier ou sur un seul bouton, toutes les aiguilles se trouvant sur le trajet d'un train déterminé.

Dans les premiers PRS, l'itinéraire était maintenu bloqué par un dispositif électrique appelé "transit" pendant toute la durée du passage du train sur cet itinéraire.

Le dernier perfectionnement de ces postes d'aiguillage est le poste dit "tous relais à transit souple" ou "PRS", dans lequel l'itinéraire reste bloqué devant le train, mais les aiguilles sont libérées au fur et à mesure de l'avancement du train, de manière à permettre la formation d'autres itinéraires.

5.2.5. - La régulation

Cette fonction, qui consiste à suivre le mouvement des trains et à le comparer à leur graphique théorique de marche et à prendre en cas de perturbation les mesures qui conviennent, telles que changements d'itinéraires, modifications d'horaires, modifications de l'ordre des trains, est assurée par un régulateur, à partir d'un poste de régulation qui couvre une certaine zone pouvant comporter plusieurs postes d'aiguillage.

Au départ, les informations parvenaient au poste de régulation, essentiellement par voie téléphonique à partir des postes d'aiguillage situés sur le terrain et d'où l'on pouvait observer à l'oeil le mouvement des trains.

5.2.5.1. - "Suivi" automatique des trains

Au cours de ces 20 dernières années, on a vu se développer, grâce aux possibilités de l'informatique des systèmes automatiques de suivi des trains.

Ces systèmes sont fondés sur un découpage de la voie en "cantons de localisation" ou "cantons-loc", ce découpage étant assez fin pour qu'il ne puisse pas y avoir modification d'une séquence de trains sur un tel canton. Les trains sont détectés automatiquement à l'entrée de ces cantons-loc, soit par des détecteurs ponctuels, soit par des circuits de voie courts (cf. chapitre 2).

Cette détection permet de visualiser au PC de régulation les mouvements des trains sur des tableaux de contrôle optique ou "TCO" présentant le schéma synoptique des voies avec leur découpage en cantons de localisation ; chaque canton est éclairé lorsqu'il est occupé, et il est surmonté de "fenêtres" sur lesquelles viennent s'afficher les numéros des trains qui l'occupent.

5.2.5.2. - Postes centralisés d'aiguillage et de régulation

Dès lors que l'on a les moyens de suivre à partir d'un PC tous les mouvements des trains sur une zone déterminée, et que l'on a la possibilité de commander à distance les différents aiguillages de cette zone, il est tout à fait possible de regrouper les postes d'aiguillage et le poste de régulation, le régulateur assurant en même temps le rôle d'aiguilleur.

Par ailleurs, le calculateur qui assure le suivi des trains dispose de toutes les informations nécessaires pour commander automatiquement les itinéraires, et l'on peut alléger considérablement la fonction "aiguillage", les opérateurs n'ayant à intervenir qu'en cas de perturbation.

C'est sur ces principes qu'est conçu par exemple le nouveau PRS de Versailles-Chantiers, qui supervise les lignes de la Région Ouest entre Paris Montparnasse et Rambouillet (cf. fig. 8).

... /

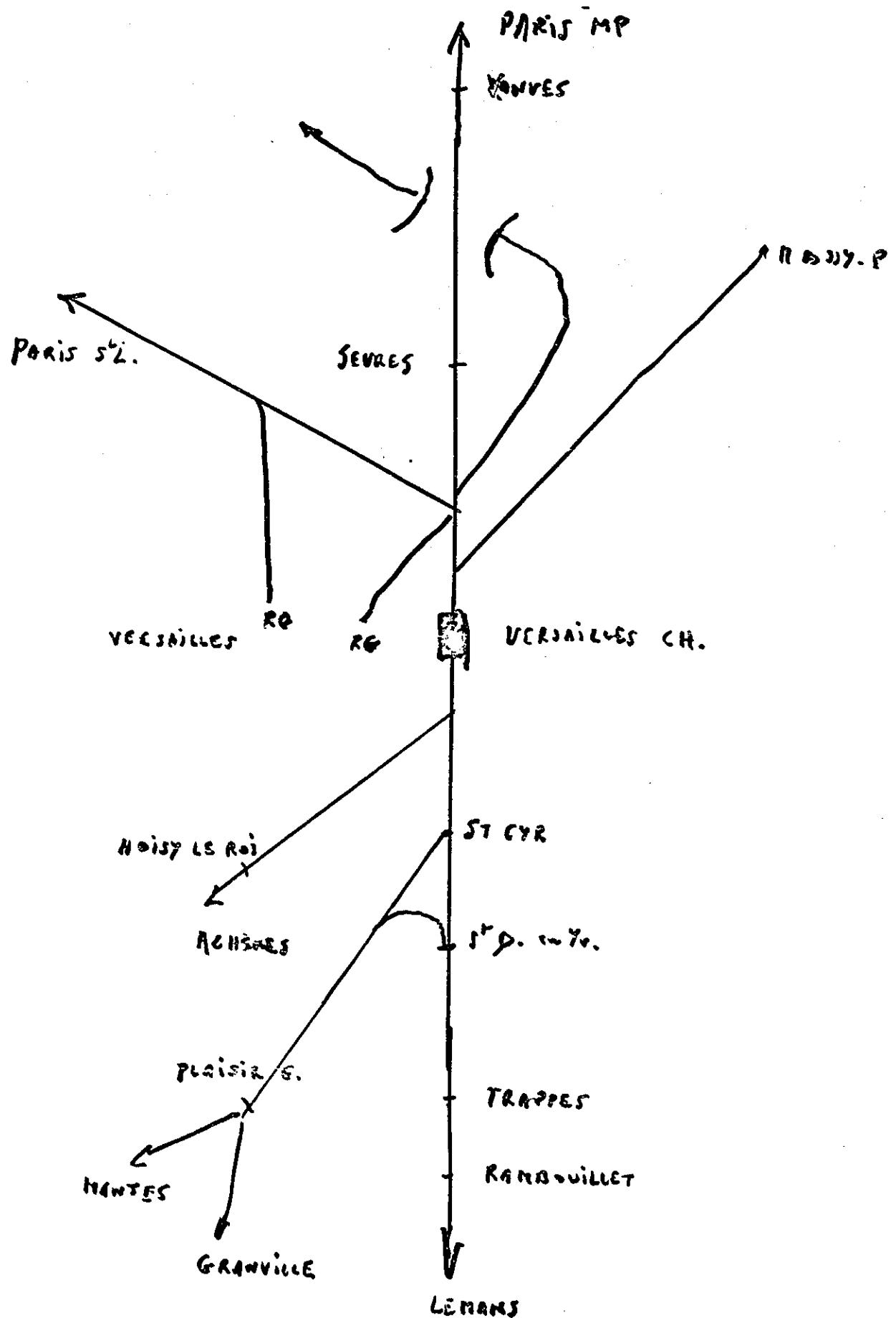


Fig. 8 - Zone couverte par le PRS "Versailles-Chantiers"

5.3. - Automatisation des métros

Comme on l'a indiqué plus haut, l'automatisation a été beaucoup plus développée dans les métros que sur les réseaux ferroviaires de type de celui de la SNCF.

Sur de nombreux réseaux actuels, même lorsqu'il existe un conducteur, toutes les fonctions de conduite ont été automatisées, et l'on trouve en général

5.3.1. - Une automatisation de la sécurité, appelée "conduite manuelle contrôlée" pouvant comporter :

- un dispositif d'arrêt automatique en cas de franchissement intempestif d'un signal au rouge,
- un dispositif de contrôle de vitesse, assurant une protection contre les survitesses.

5.3.2. - Un système de pilotage automatique, qui doit pouvoir assurer les fonctions suivantes, après une validation éventuelle donnée par l'agent à bord :

- fermeture des portes des trains,
- départ de la station,
- circulation dans l'interstation en respectant les limitations de vitesse et la signalisation,
- arrêt du train à la station suivante avec une bonne précision, quelle que soit la charge du train,
- ouverture des portes.

Ce système doit pouvoir en outre recevoir des ordres de régulation du trafic d'un poste central et les appliquer automatiquement sous forme de variation d'allure et de variation de temps de stationnement.

Ces systèmes de pilotage automatique sont conçus suivant des principes différents selon les réseaux. On peut les ranger cependant en 4 grandes classes :

- programme de marche embarqué :
ex. Métro de Moscou,
- programme de marche continu inscrit dans la voie :
ex. Métro de Paris.

Dans ce métro, le programme de marche est constitué par un câble, formant une boucle, fixé entre les rails, et présentant des croisements à des distances correspondant à un temps de parcours de 300ms lorsque le train circule à la vitesse de consigne (cf. figure 9) :

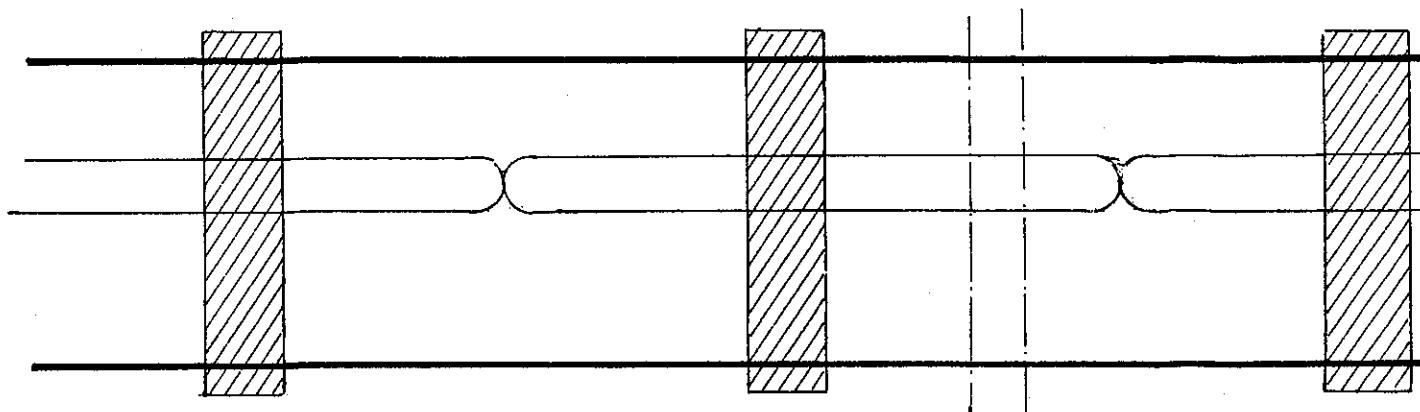


Fig. 9

Ce câble est parcouru par un courant alternatif, et la motrice est équipée de bobines qui captent le champ électromagnétique créé par ce courant, ainsi que les variations de ce champ au droit des redans.

Lorsque le temps de parcours d'un segment élémentaire est plus grand que 300 ms, le train doit accélérer ; si ce temps est plus petit que 300 ms, il y a commande de ralentissement.

Nota : c'est ce mode de pilotage automatique que l'on trouve également sur le VAL.

. programme de marche discret, la commande étant assurée, pour l'envoi des trains, par une transmission depuis le sol, de consignes de vitesses valables en général sur la longueur d'un canton,

Cette transmission peut se faire par les rails, ou par des lignes posées entre les rails.

ex. - Victoria Line à Londres

- BART à San Francisco,

. une quatrième classe enfin, qui se rapproche de la précédente, repose sur un dialogue permanent entre le train et le sol par l'intermédiaire d'une ligne posée sur la voie.

ex. - Système "A46" de l'UIC, appliquée au métro de Hambourg

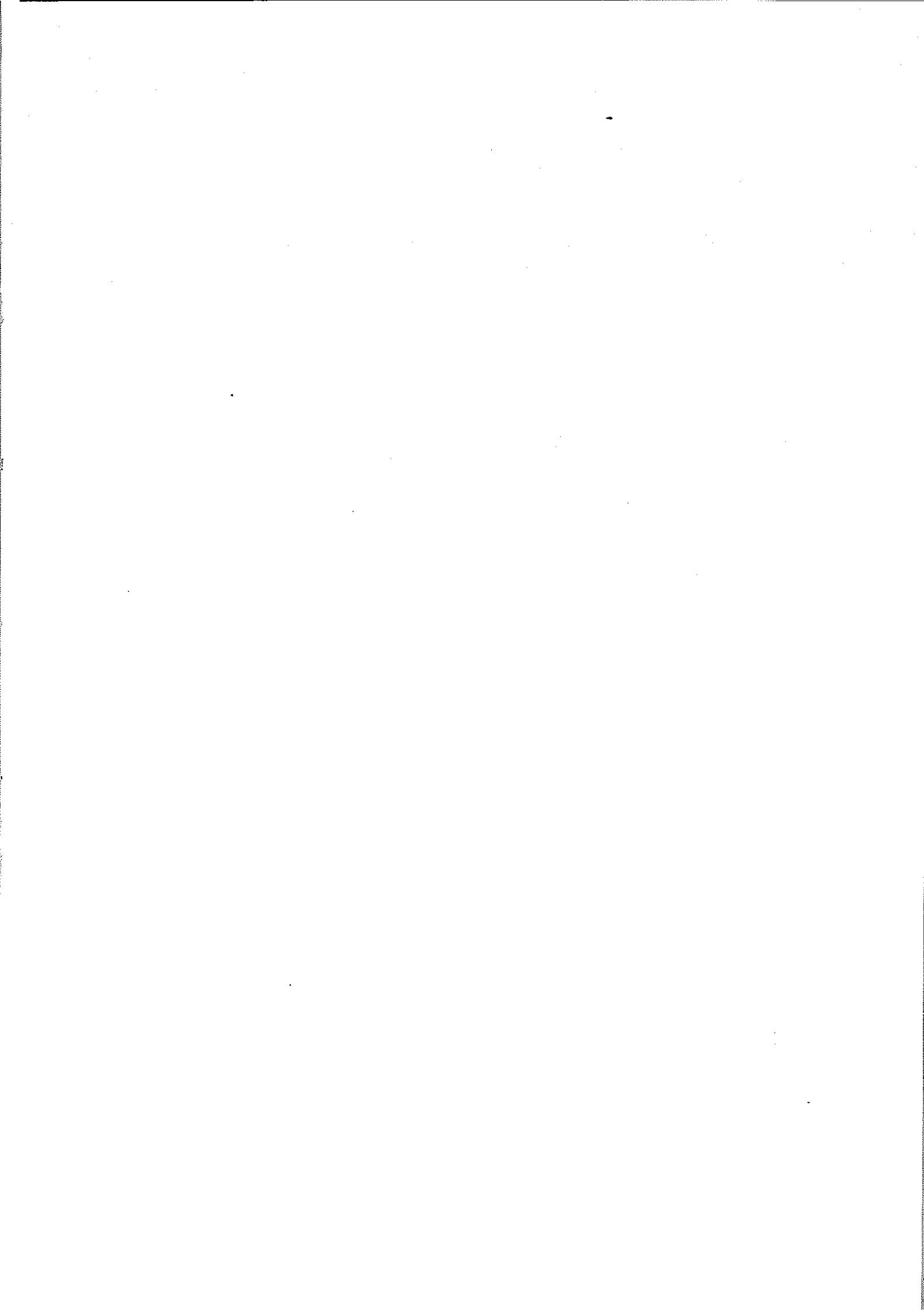
Grâce à ce dialogue, les trains peuvent recevoir en permanence du sol des informations sur les particularités de la voie, et sur les trains les précédant, et calculer leur vitesse en fonction de ces informations.

5.3.3. - Un poste de régulation centralisée, qui supervise le fonctionnement de l'ensemble de la ligne.

Ces postes sont en général équipés :

- . d'un tableau de contrôle optique (TCO), présentant un schéma synoptique de la ligne et de la position des trains
- . d'un calculateur qui assure le suivi des mouvements des trains, la gestion de ce TCO, et qui peut réagir automatiquement aux petites perturbations survenant sur la ligne.

En cas de perturbations importantes, l'intervention des opérateurs est en général nécessaire.





II - LES CAPTEURS

Comme il l'a été indiqué ci-dessus, les capteurs sont des organes essentiels pour les installations de régulation de systèmes de transport.

Ils correspondent cependant à des besoins différents selon que l'on s'adresse aux systèmes de trafic routier ou aux transports dits "guidés".

Nous allons donc examiner successivement ces deux grands types d'application.

1. LES CAPTEURS POUR L'EXPLOITATION DE LA ROUTE

1.1. - Généralités

Dans l'exploitation de la route, on peut distinguer 2 grands domaines pour lesquels une instrumentation de mesure du trafic est nécessaire :

- les opérations de régulation, qui nécessitent en général des mesures et un traitement en temps réel ;
- les enquêtes en vue de statistiques ou d'étude, et pour lesquelles le traitement peut être différé.

1.2. - Les différentes grandeurs intéressant l'exploitation de la route

Lorsqu'on essaie de faire un recensement des différentes grandeurs que l'on peut être amené à mesurer, ou des différents événements que l'on cherche à détecter, on arrive à une liste assez importante de paramètres que l'on peut classer ainsi : cf. tableau suivant extrait du rapport (1) de l'I.R.T.

Il n'est pas question de traiter la mesure de toutes ces grandeurs dans un cours, et nous n'évoquerons que les mesures les plus courantes :

- Mesures des principales caractéristiques du trafic :
 - . débit Q
 - . vitesse V
 - . concentration K ou taux d'occupation TO
- Classification des véhicules
- Matériels d'enquête

(1) "L'instrumentation pour l'exploitation de la route" - Déc. 80 -

A - Mesure de grandeurs spécifiquesI. Caractéristiques de trafic

- Fiche n° 1 : Capteurs et détecteurs pour le comptage
 n° 2 : Capteurs et détecteurs de présence et de taux d'occupation
 n° 3 : La détection et le traitement des vitesses des véhicules
 n° 4 : Mesure de la concentration
 n° 5 : Mesure des accélérations des véhicules
 n° 6 : Evaluation en temps réel des temps de parcours

II. Evènements intéressant le trafic

- Fiche n° 7 : Détection d'incidents ou d'accidents
 n° 8 : Détection automatique des infractions

III. Trajectoires des véhicules

- Fiche n° 9 : Mesure des trajectoires des véhicules

IV. Caractéristiques des véhicules

- Fiche n° 10 : Classification des véhicules
 n° 11 : Détecteurs de pesée
 n° 12 : Mesure des caractéristiques géométriques des véhicules

V. Paramètres relatifs à l'environnement

- Fiche n° 13 : Mesure du bruit des véhicules
 n° 14 : Mesure de la pollution émise par les véhicules
 n° 15 : Avertisseurs et détecteurs de verglas
 n° 16 : Détection du brouillard
 n° 17 : Mesure de la visibilité de la route et de la signalisation

VI. Les déplacements de personnes

- Fiche n° 18 : Mesures sur les piétons
 n° 19 : Comptage de passagers à bord de véhicules

B - Mesures plus générales

- Fiche n° 20 : Dispositifs d'enquête au sol
 n° 21 : Photographie aérienne
 n° 22 : Reconnaissance d'image vidéo
 n° 23 : Evolution de l'instrumentation routière dans le cas de mise en service de véhicules actifs
 n° 24 : Véhicules laboratoires

C - Enregistrement, traitement et transmission des données

- Fiche n° 25 : Traitement et enregistrement de données
 n° 26 : Transmission de données
 n° 27 : Réglage automatique de paramètres d'armoires de feux
 n° 28 : Estimation des variables de trafic

1.3. - Mesure des grandeurs caractéristiques du trafic

Ces grandeurs sont essentiellement le débit Q , la vitesse V et la concentration K , dont les valeurs moyennes sont reliées en régime permanent, par la relation :

$$Q = K \times V \quad Q = \text{véh/heure}$$

$$K = \text{véh/Km}$$

$$V = \text{km/heure}$$

Signalons tout de suite ici une distinction subtile entre 2 notions qui suscitent parfois des confusions :

- on appelle capteur un dispositif sensible au phénomène physique que l'on cherche à mesurer - le capteur traduit en général la grandeur que l'on mesure sous forme d'un signal électrique -
- le détecteur est l'organe qui traite ce signal électrique (amplification, écrétage, mise à l'échelle, numérisation,....etc....), en vue d'en extraire une mesure appropriée à l'usage que l'on veut en faire (affichage visuel, signal calibré pour traitement ultérieur dans un ordinateur,....etc....).

Ces deux termes sont cependant très souvent employés - à tort - indifféremment l'un pour l'autre dans la littérature.

.../

1.3.1. - Débit

La mesure du débit suppose que l'on puisse détecter le passage d'un véhicule en un point donné de la chaussée ; il se mesure à l'aide de détecteurs de passage ou de présence dont il existe une très grande variété.

1.3.1.1. - Les capteurs et détecteurs de passage d'essieux.

- Le plus connu est le détecteur à tube pneumatique, constitué d'un tube de caoutchouc fixé par ses extrémités sur la route. Le passage des roues d'un véhicule crée une onde de pression qui vient activer, par l'intermédiaire d'une membrane, un contact situé à l'une des extrémités. Ce capteur, facile à poser, est très utilisé pour des enquêtes de courte durée ; sa fragilité et sa faible durée de vie (quelques jours à quelques semaines suivant les sites) ne permettent pas de l'employer pour des opérations d'exploitation permanentes.
- Un 2ème capteur de passage d'essieux a été mis au point plus récemment en France ; il s'agit d'un détecteur piézo-électrique constitué d'un tube coaxial, comportant 2 conducteurs séparés par une céramique (fig. 2) :

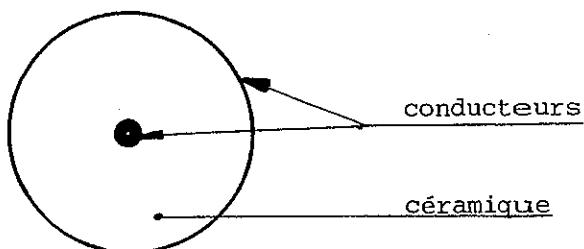


Fig. 2 - Structure d'un câble piézo-électrique

Lorsqu'une variation de pression est exercée sur un tel câble, il s'établit entre les 2 armatures une différence de potentiel V donnée par la formule :

$$V = k \cdot l \cdot \Delta P \times e^{-\frac{t}{\tau}}$$

où l est la longueur de la partie du câble exposée à la pression, et ΔP est la variation de pression ; τ est une constante de temps.

Lorsqu'on enterre un tel câble dans la chaussée, à quelques cm de profondeur, le passage des roues d'un véhicule produit, entre les 2 armatures, un signal ayant la forme suivante (fig. 3) :

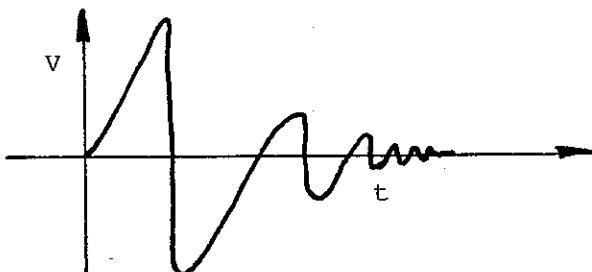


Fig. 3

Les oscillations de ce signal correspondent aux ondes de compression et de décompression de la chaussée au passage du véhicule.

Le traitement de ce signal consiste (fig. 4) à l'amplifier, le redresser et à le faire passer dans des comparateurs pour déterminer le nombre d'essieux lourds et d'essieux légers.

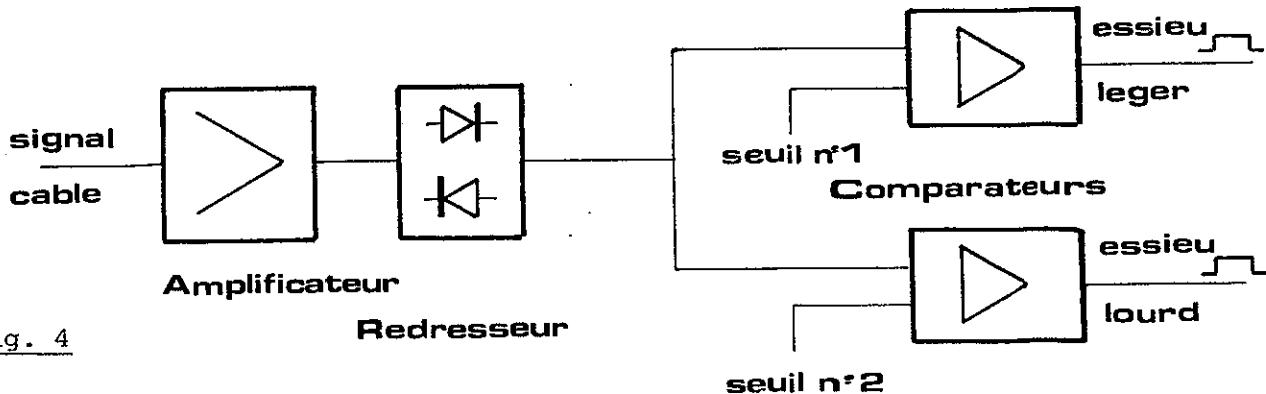


Fig. 4

Un tel détecteur présente les avantages suivants :

- signal à front raide permettant d'obtenir une bonne précision si on veut utiliser ces détecteurs par des mesures de vitesse ;
- possibilité d'évaluer approximativement le poids à l'essieu : la précision, variable avec la vitesse et le poids, est de l'ordre de 10%. Son principal inconvénient est qu'il est fragile et nécessite une pose très soigneuse, dans une saignée faite dans la chaussée ; afin de protéger son armature extérieure, une solution couramment utilisée consiste à le fixer à l'aide d'une résine dans un tube métallique en U (fig. 5) :

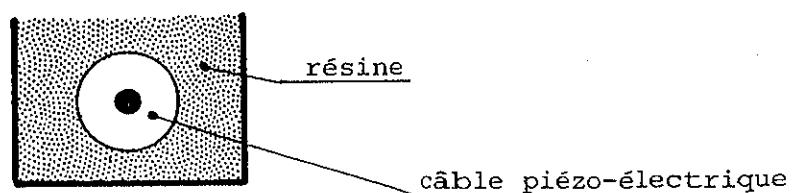


Fig. 5 - Protection d'un capteur piézo-électrique

D'une façon générale, le défaut principal des capteurs d'essieux est qu'ils mesurent les débits en essieux/heure, et non en véhicules/heure ; pour obtenir un débit en termes de véhicules, il convient d'appliquer à la mesure obtenue un coefficient - voisin en général de 0,5 - qui doit être d'abord apprécié par des observations visuelles.

1.3.1.2. - Les boucles électromagnétiques

Les capteurs les plus utilisés actuellement pour les mesures de trafic sont les boucles électromagnétiques qui présentent les avantages suivants :

- elles sont peu coûteuses (fil électrique ordinaire) ;
- elles sont peu fragiles, sous réserve qu'on prenne quelques précautions lors de la pose ;
- elles sont sensibles au passage des véhicules ;
- elles fournissent des mesures relativement précises.

Leur inconvénient est qu'elles nécessitent une saignée dans la chaussée de l'ordre de 5cm de profondeur pour leur installation.

a) Principe : lorsque l'on alimente une boucle électromagnétique, constituée d'une ou plusieurs spires, avec un courant alternatif de haute fréquence (de l'ordre de 100 kHz), la présence d'un véhicule (ou de tout autre objet conducteur) dans le champ électromagnétique de la boucle, provoque une diminution de la self de la boucle, en raison des courants de Foucault induits dans la masse métallique du véhicule qui créent un champ s'opposant au champ principal ; cette variation de self est difficile à calculer théoriquement en raison de la géométrie complexe du véhicule et de la difficulté que l'on rencontre pour modéliser des courants de Foucault ; des mesures expérimentales ont montré quelle est de l'ordre de 5%.

.../

- b) DéTECTEURS : le changement de self de la boucle peut être mesuré de différentes façons, et l'on trouve des détECTEURS :
- à changement de fréquence
 - à changement de tension
 - à changement de phase

Les plus courants sont les détECTEURS fondés sur une mesure du déphasage existant entre le signal fourni par la boucle et le signal fourni par un oscillateur de référence (fig. 6) fonctionnant à la fréquence de résonance de la boucle - celle-ci pouvant être réglée par une capacité variable C -

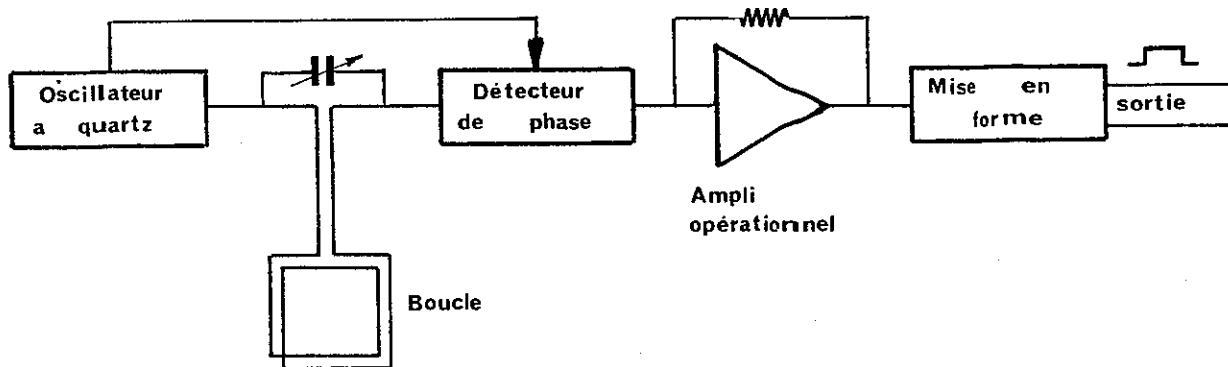


Fig. 6 - Schéma d'un détecteur avec mesure de changement de phase

A titre d'exemple, on a présenté ci-dessous (fig. 7) un schéma de circuit détECTEUR de phase, comportant 2 transistors formant une porte "NAND". On peut voir facilement que la tension de sortie de ce circuit se présente sous forme d'un signal rectangulaire, et que la valeur moyenne passe de $\frac{1}{2} V_{CC}$ à 0 quand le déphasage entre les 2 signaux d'entrée passe de 0 à 180°

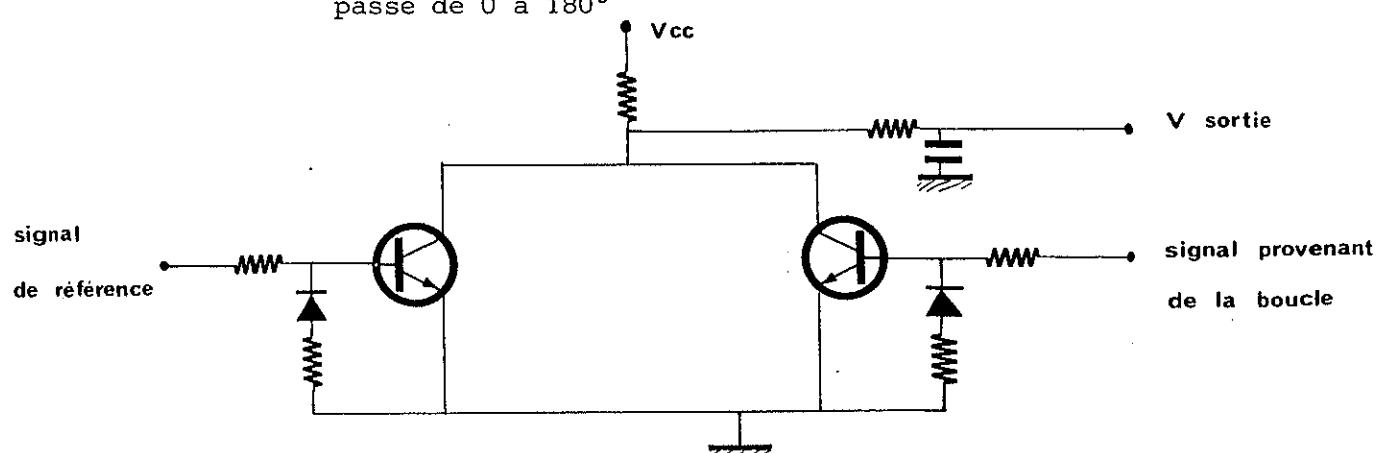


Fig. 7 - Circuit de mesure de phase

c) Implantation des boucles : comme on l'a dit plus haut, les boucles sont insérées dans des saignées d'environ 5 à 10 cm de profondeur, taillées dans la chaussée à l'aide d'une scie circulaire à garniture de diamant. La forme de la boucle est rectangulaire et les dimensions les plus courantes sont de l'ordre de 2m x 1m50 (fig. 8).

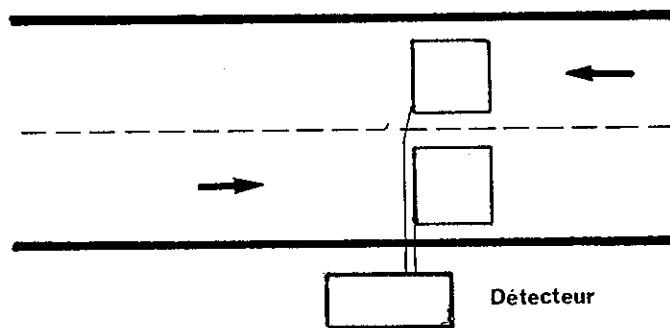


Fig. 8 - Implantation de boucles sur une chaussée

d) Précision de comptages par boucles électromagnétiques :

La précision des comptages obtenus par une boucle dépend essentiellement de la composition et du comportement du trafic. Elle est d'autant meilleure :

- . que le trafic est discipliné et que les véhicules suivent convenablement les voies tracées sur la chaussée ;
 - . que le trafic est homogène, et ne comporte pas trop de 2 roues : les 2 roues légers ne sont en effet détectés que lorsqu'ils passent à proximité des bords des boucles.
- Les précisions que l'on obtient couramment sur autoroutes sur les mesures de débit sont de l'ordre de 3 à 5 %.

.../

e) Cas de routes à plusieurs voies :

Lorsqu'on cherche à compter le trafic sur des routes à plusieurs voies, des erreurs peuvent survenir du fait de véhicules qui chevauchent la séparation entre voies (fig. 9)

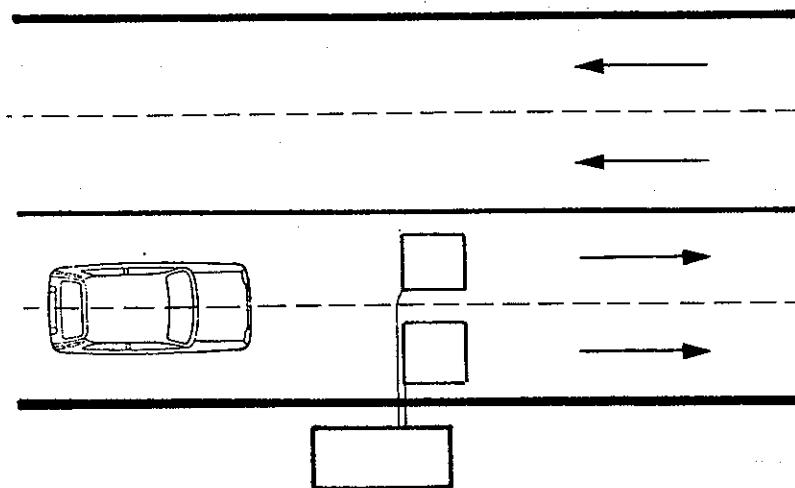


Fig 9 - Comptage de véhicules sur une chaussée à plusieurs voies

Une solution, qui est employée couramment, consiste à implanter $2n - 1$ capteurs sur une route à n voies. Par exemple pour une route à 2 voies, on adopte la configuration suivante (fig. 10)

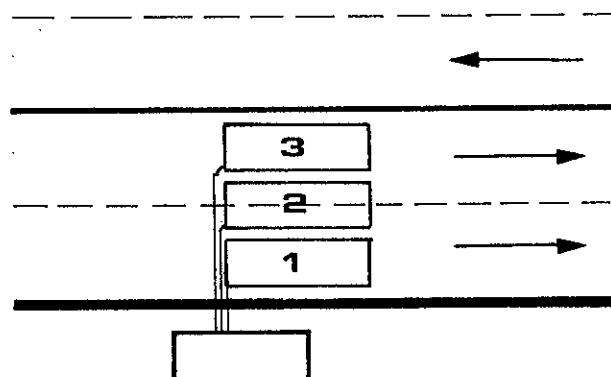


Fig 10 - Configuration à $2n - 1$ boucles pour n voies

.../

Une méthode de comptage possible consiste à partir des 2 hypothèses suivantes :

- il ne peut y avoir simultanément 3 véhicules côte à côte sur une route à 2 voies ;
- 2 véhicules circulant sur les 2 voies voisines sont toujours légèrement décalés l'un par rapport à l'autre et ne peuvent exciter simultanément les détecteurs les concernant.

Dans ces conditions, on réalise, à l'aide de circuits logiques, la fonction $f(x_1 \ x_2 \ x_3)$ ayant la table de vérité suivante (fig. 11) $x_1 \ x_2 \ x_3$ représentant l'état, excité ou désexcité, des détecteurs.

Signal de détecteurs			n° de l'état	$f(x_1 \ x_2 \ x_3)$
x_1	x_2	x_3		
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	2	1
0	1	1	3	1
1	0	0	4	1
1	0	1	5	0
1	1	0	6	1
1	1	1	7	0

Fig 11

On peut tracer le diagramme de fluence suivant, représentant les transitions entre états (fig. 12) de l'ensemble des détecteurs.

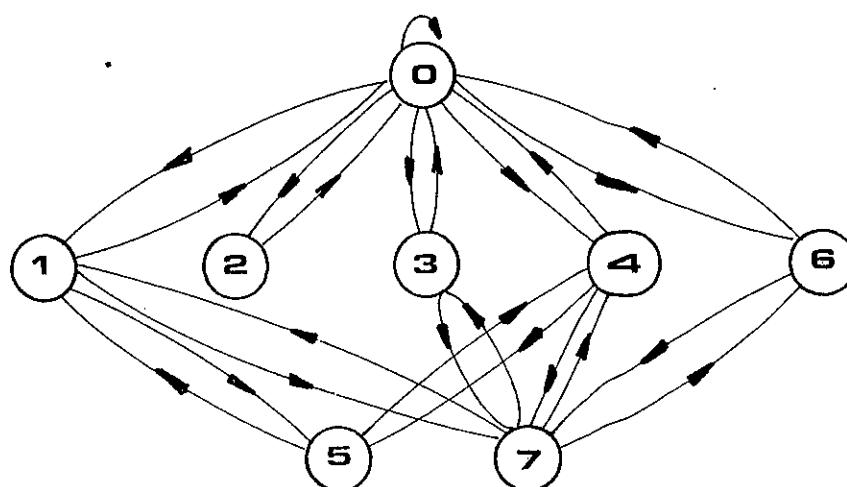


Fig 12

Le principe du dispositif de comptage consiste à compter un véhicule chaque fois que la fonction $f(x_1, x_2, x_3)$ passe de 1 à 0.

1.3.1.3. - Autres capteurs de véhicules

D'autres phénomènes physiques peuvent servir à détecter le passage ou la présence d'un véhicule, mais sont plus rarement utilisés, du moins en France :

- a) les radars à effet Doppler : nous verrons leur principe au § suivant ; ils sont peu utilisés pour les mesures de débit, étant donnée l'imprécision causée par la largeur de leur faisceau
- b) les magnétomètres : le passage d'un véhicule - du fait des matériaux ferreux qui le constituent - crée localement une distorsion du champ magnétique terrestre (cf. fig. 13)

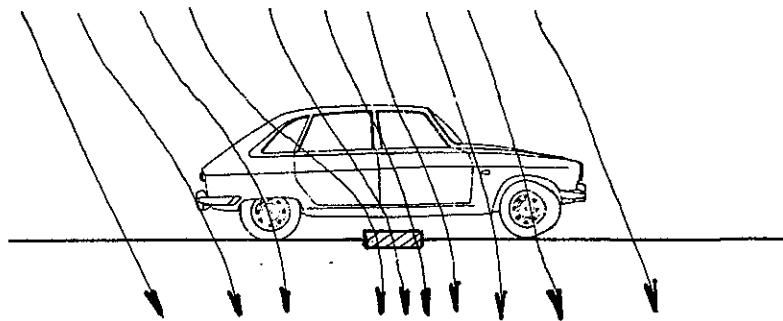


Fig 13 - Distorsion du champ magnétique terrestre

Il est possible de détecter ce phénomène à l'aide de bobines placées dans la chaussée, dans lesquelles le changement du flux magnétique les traversant induit une tension.

Ces détecteurs, relativement peu encombrants et faciles à installer, sont cependant sensibles à toutes les variations du champ terrestre et d'un réglage difficile.

Ils ne sont ni fabriqués, ni utilisés en France.

.../

c) Les capteurs à ultrasons : ces capteurs utilisent des transducteurs constitués d'un matériau piézoélectrique excité par un champ électromagnétique à haute fréquence (20 kHz environ) créé par une bobine. La détection est fondée sur le fait qu'une onde ultrasonore, lorsqu'elle rencontre un obstacle, est réfléchie et revient vers la source qui l'a émise.

2 principes sont utilisés :

- l'effet Doppler : le capteur est braqué obliquement par rapport au trafic (fig. 14) et émet en continu.

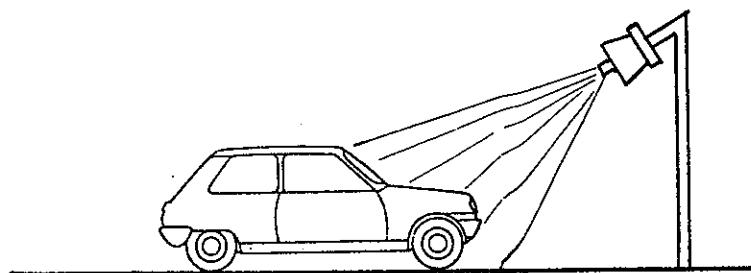


Fig 14 - Détecteur à ultrasons à effet Doppler

Lorsqu'un véhicule en mouvement traverse le faisceau, il renvoie une onde ultrasonore dont la fréquence est décalée par rapport à la fréquence de la source. En mélangeant ces 2 fréquences, on produit un battement à basse fréquence que l'on appelle fréquence Doppler. La détection de ce battement fournit une indication du passage d'un véhicule.

On verra plus longuement au § suivant le principe de l'effet Doppler.

- la mesure du temps aller-retour d'une impulsion (fig. 15)

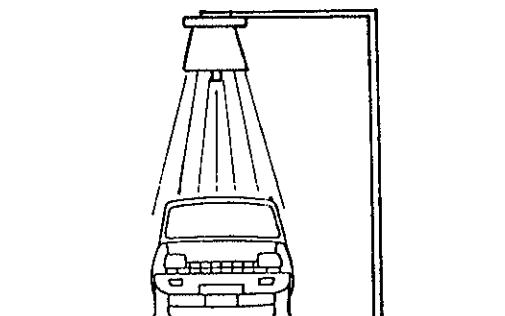


Fig 15

Dans ce cas, le faisceau ultrasonore est perpendiculaire à la chaussée et le capteur émet des impulsions à intervalles de temps réguliers.

On mesure le temps mis par chaque impulsion pour revenir à la source : ce temps est plus court lorsqu'un véhicule se présente dans le faisceau.

Ces détecteurs, très utilisés dans certains pays comme le Japon, ne sont ni produits, ni utilisés en France.

Leur principal avantage est qu'ils sont aériens, et ne nécessitent pas de creuser la chaussée ; leur principal inconvénient est qu'ils sont sensibles au vent.

d) Capteurs optiques :

Nous citerons pour mémoire les barrières à cellule photo électrique, qui sont utilisées dans certains sites, tels que les passages de péages, mais sont mal adaptées à des mesures sur des routes à plusieurs voies.

1.3.2. - Vitesse

2 méthodes principales sont utilisées pour mesurer les vitesses de véhicules :

1.3.2.1. - Mesure de l'intervalle de temps entre les passages d'un véhicule sur 2 capteurs de passage voisins
(boucles ou capteurs piézoélectriques par exemple) (fig. 16)

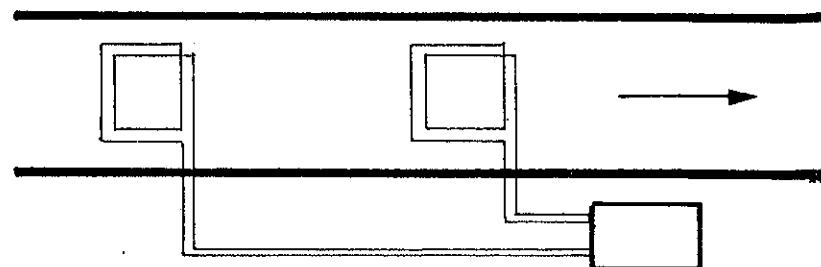


Fig 16 - Mesure de la vitesse par 2 boucles

... /

Il convient de veiller à bien régler les 2 détecteurs de façon que les zones où ils sont excités soient bien semblables.

On peut obtenir par cette méthode des précisions de l'ordre de 3%.

1.3.2.2. - Le radar à effet Doppler :

a) Principe :

Lorsqu'une onde électromagnétique de fréquence f est envoyée vers un obstacle par une source (fig. 17), la fréquence de l'onde réfléchie est égale à f si l'obstacle est immobile ; par contre, elle est décalée d'une valeur Δf définie par

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{2V}{C} \quad \text{si l'obstacle se déplace à la vitesse } V \text{ par rapport à la source (} C \text{ étant la vitesse de la lumière).}$$

Δf est positif si l'obstacle se rapproche, négatif s'il s'éloigne.

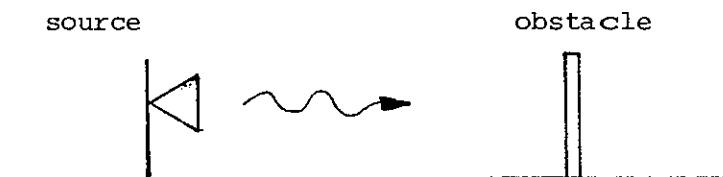


Fig 17

L'explication de ce phénomène est simple, si l'on considère les diagrammes suivants (fig. 18 a, b, c).

La figure 18 b montre l'onde réfléchie par un obstacle fixe : elle arrive avec un retard $\frac{2d}{C}$, d étant la distance de l'obstacle, mais sa période T est la même que l'onde d'origine.

.../

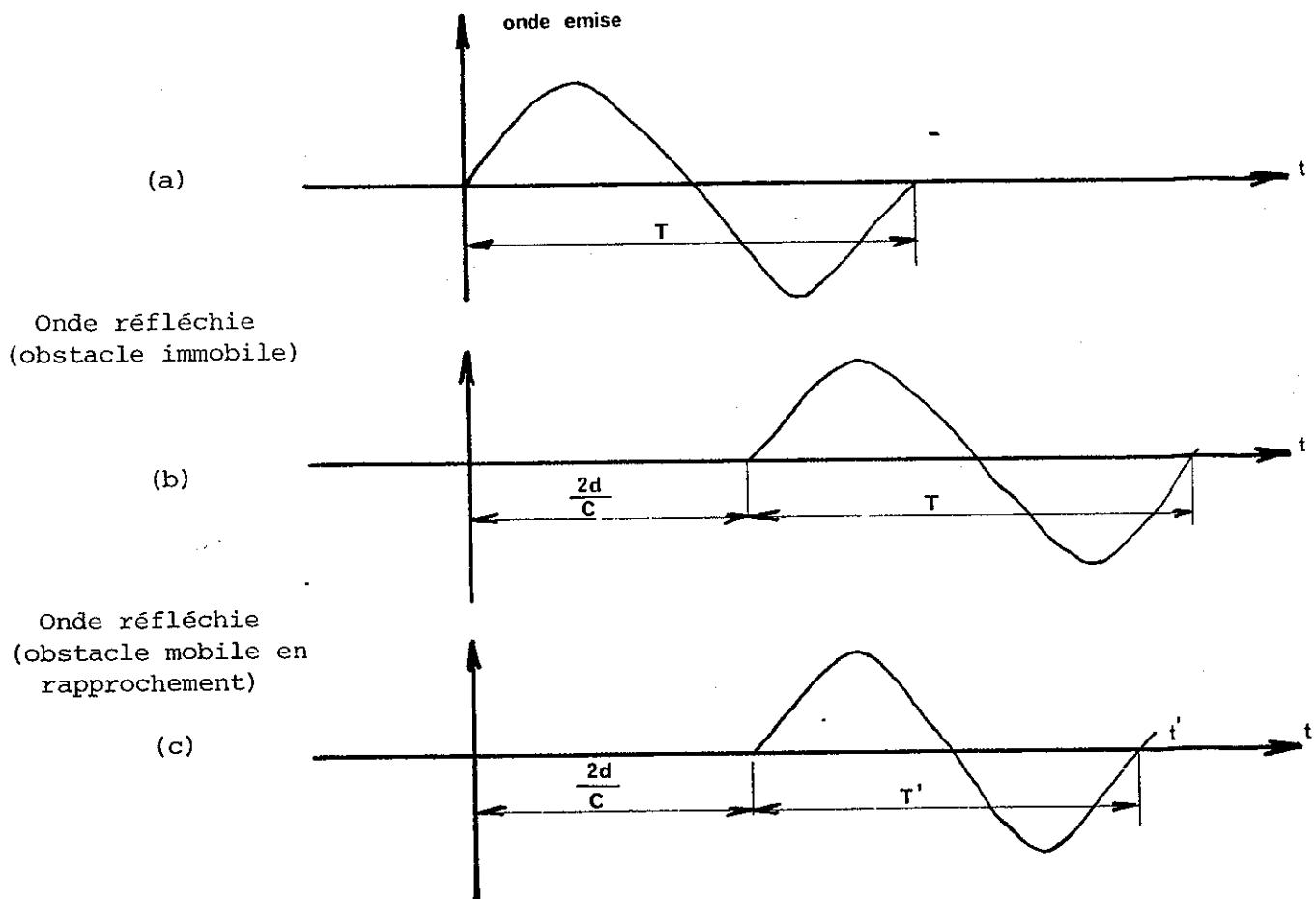


Fig. 18 a, b, c

La figure 18c montre l'onde reçue d'un obstacle en rapprochement et situé à la même distance que l'obstacle fixe quand le signal émis commence à lui parvenir. Au bout d'une période T , l'obstacle se trouve à une distance $d_1 = d - VT$.

Le signal émis par la source à la fin de la période T lui revient donc au bout du temps t' :

$$t' = \frac{2d_1}{c} + T = T + \frac{2d}{c} - \frac{2VT}{c}$$

La période du signal reçu n'est plus T , mais :

$$T' = T - \frac{2VT}{c}$$

$$\text{d'où } \frac{\Delta T}{T} = \frac{T' - T}{T} = - \frac{2V}{c}$$

b) Réalisation d'un capteur radar à effet Doppler :

Le schéma d'un tel capteur est représenté sur la fig. 19 :

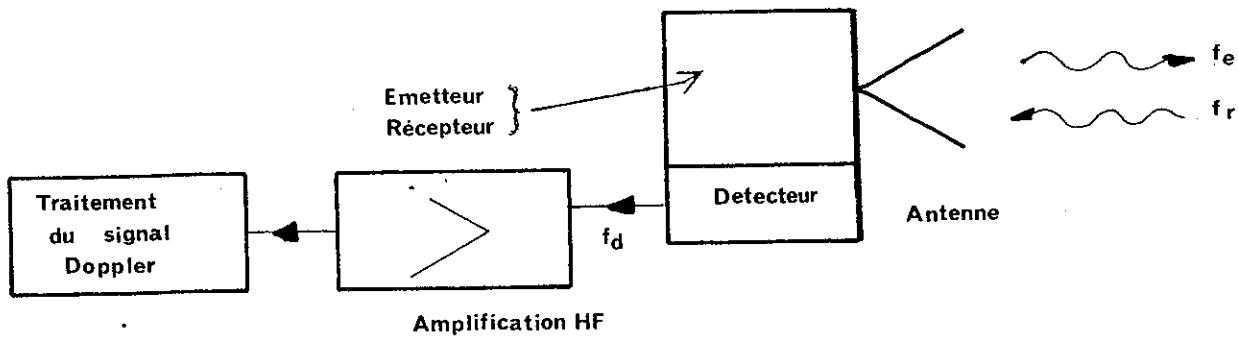


Fig 19 - Radar à effet Doppler

L'émetteur est en général une diode Gunn fonctionnant aux environs de 10 GHz, placée dans une cavité résonante couplée avec une antenne cornet. La réception peut se faire par la même antenne, l'extraction du battement $f_d = f_e - f_r$ entre fréquence émise et fréquence reçue étant effectuée dans un détecteur constitué d'une simple diode (diode Schottky). Cette fréquence est amplifiée, puis traitée dans un organe de traitement constitué en général d'un compteur et d'une horloge.

La précision obtenue par un tel capteur est de l'ordre de 3%.

Ces capteurs sont très utilisés :

- par la police,
- dans les systèmes d'exploitation, soit pour mesurer la vitesse des véhicules, soit plus simplement dans les carrefours à commande adaptative par le trafic pour détecter l'arrivée d'un véhicule au carrefour.

Nota : Lorsqu'on fait des observations sur le trafic, on s'intéresse souvent aux vitesses moyennes des véhicules. On doit faire attention au type de moyenne que l'on calcule - moyenne spatiale ou temporelle.

La moyenne spatiale (fig. 20) s'obtient en prenant par exemple par photographie les positions des véhicules sur une section de route à 2 instants différents séparés de Δt .

Pendant ce temps, les n véhicules de cette section ont fait des parcours Δx_i

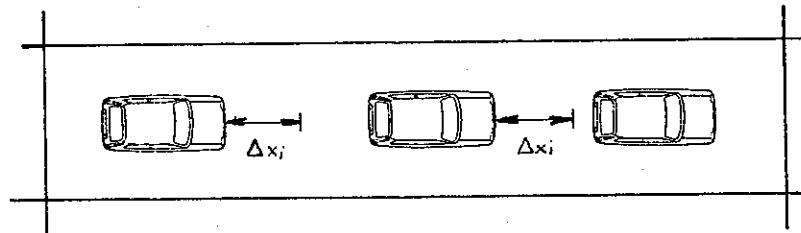


Fig 20

$$\text{La vitesse moyenne est } v_m = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{\Delta t} = \frac{\sum v_i}{n}$$

C'est la moyenne arithmétique des vitesses des différents véhicules.
La moyenne temporelle s'obtient (fig 21) en mesurant en un point A de la route les temps Δt_i mis par n véhicules pour franchir une petite distance Δx .

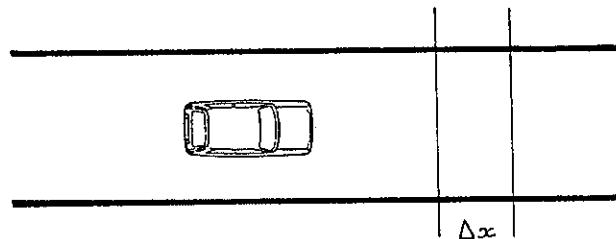


Fig 21

$$\text{La vitesse moyenne est } v_m = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}$$

$$\text{soit : } \frac{1}{v_m} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_i}{\Delta x} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_i}$$

La vitesse moyenne est donnée par la moyenne harmonique des vitesses des véhicules. Ces 2 moyennes - harmonique et arithmétique - ne sont égales que pour un flux régulier de véhicules.

.../

1.3.3. - Concentration

Par définition la concentration du trafic est le nombre de véhicules par unité de longueur - par ex. le km -

La première idée qui vient à l'esprit pour mesurer ce paramètre est de procéder à un comptage - décomptage aux 2 extrémités du tronçon à observer. Cette méthode ne donne cependant pas de bons résultats, car elle revient à intégrer des mesures entachées d'erreurs.

Une méthode, conçue par la S.F.I.M. (Société Française d'Instruments de Mesure) consiste à mesurer en un point donné de la route, à l'aide d'un radar à effet Doppler, le nombre et la vitesse des véhicules passant pendant un temps donné T ; on en déduit le nombre de véhicules se trouvant sur une longueur VT (détecteur "SILVA"). Ceci suppose que les véhicules roulent régulièrement et ne se dépassent pas. En outre, le radar à effet Doppler n'a pas une grande précision en comptage de véhicules en raison de la largeur de son faisceau (10° environ).

Une dernière méthode, à l'étude en Suède, consiste à utiliser des boucles très longues (de l'ordre de 30 à 40m pour mesurer par exemple le nombre de véhicules attendant à l'entrée d'un carrefour ; mais ce système est encore au stade expérimental. C'est pourquoi on remplace très souvent la concentration par une autre grandeur qui lui est équivalente quand le trafic est régulier : le taux d'occupation.

1.3.4. - Taux d'occupation

C'est le rapport entre le temps pendant lequel un point de la chaussée est occupé et le temps total de mesure. Cette grandeur est mesurée facilement par n'importe quel détecteur de passage ou de présence de véhicules. Elle caractérise bien la densité du trafic au même titre que la concentration.

... /

1.4. - Classification des véhicules :

Le chercheur comme les exploitants ont le souci de connaître de plus en plus finement le trafic, et à discriminer les différentes catégories de véhicules passant sur les routes. Ce souci répond à différents besoins :

- besoins statistiques,
- nécessité de discriminer les catégories de véhicules aux péages,
- discrimination de véhicules prioritaires, tels que les autobus aux feux des carrefours.

On distingue 2 modes de discrimination suivant que l'on s'adresse au trafic général ou à une classe particulière de véhicules :

- discrimination passive,
- discrimination active par répondeurs embarqués.

1.4.1. - Discrimination passive :

1.4.1.1. - Classification PL - VL

Le besoin le plus courant des chercheurs comme des exploitants est de discriminer les PL des VL.

Le facteur discriminant le plus simple est la longueur, la frontière entre PL et VL se situant autour de 5m.

Il suffit par conséquent de disposer 2 détecteurs de présence espacés de 5m (fig. 22) ; ils ne seront excités simultanément que s'ils sont occupés par un PL. Toutefois, en trafic très dense, il peut arriver que des VL soient séparés de moins de 5m, et cette mesure s'applique mal dans ce cas.

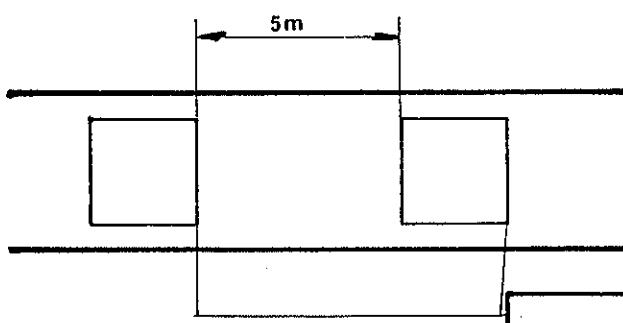


Fig 22

... /

1.4.1.2. - Classification en VL et différentes catégories de PL

- Le dispositif le plus simple est un dispositif à l'étude au T.L.R.L. (Transport and Load Research Laboratory) britannique fondé sur la mesure :
 - . de la longueur
 - . du nombre d'essieux
 - . des distances entre essieux.

Ces paramètres permettent de reconstituer la silhouette générale du véhicule. Leur mesure se fait (fig 25a et b) :

- . soit à l'aide de 2 boucles et d'un détecteur d'essieux,
- . soit à l'aide d'une boucle et de 2 détecteurs d'essieux :

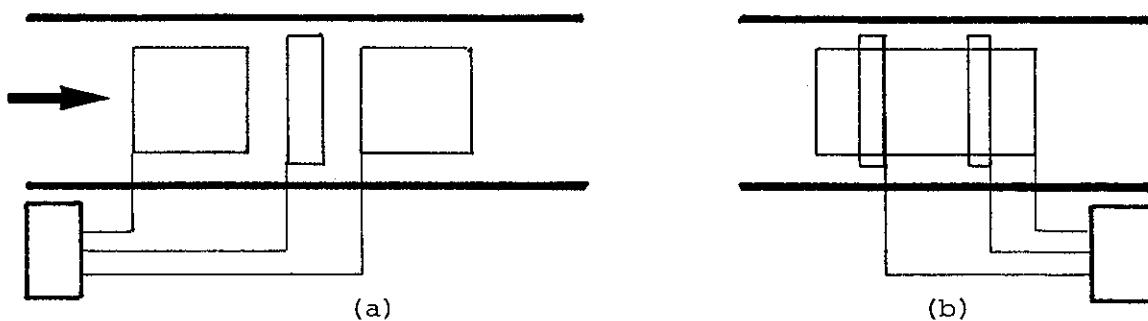


Fig 25

- Un autre dispositif, conçu par la C.G.A. pour les barrières de péage, consiste à utiliser un comptage d'essieux, et une barrière de cellules photoélectriques disposées verticalement qui permettent :
 - . de mesurer la hauteur du capot et de l'ensemble du véhicule,
 - . de détecter la présence de remorques ou caravanes.

.../

1.4.2. - Discrimination par répondeurs embarqués :

Pour identifier à coup sûr une classe particulière de véhicules, il est possible d'équiper ces véhicules de dispositifs actifs ou "répondeurs" qui permettent un échange de message avec une antenne située sur ou dans la chaussée.

Ce mode de discrimination est utilisé en particulier pour reconnaître les autobus dans les systèmes de prise en compte des autobus aux feux de carrefours.

Dans ce cas, le message peut être une simple tonalité ou un code donnant par exemple le n° du bus et le n° de la ligne.

Parmi les principes qui sont exploités ou qui ont été expérimentés, nous citerons :

1.4.2.1. - Les répondeurs HF (dans la bande voisine de 100 kHz).

Dans ce cas, l'antenne est une boucle située dans la chaussée, et l'émetteur est situé sous l'autobus.

Ex : Système VETAG de Philips.

1.4.2.2. - Les répondeurs VHF (50 à 100 MHz) ou UHF (9 GHz).

Dans ce cas, l'émetteur est au niveau du pare-brise, et le récepteur est doté d'une antenne aérienne.

L'avantage des dispositifs UHF est qu'ils sont très directifs, et permettent de bien distinguer le sens de circulation de l'autobus.

Ex : Système UHF "OVIDE" de la S.F.I.M. qui équipe les tramways du Mongy.

1.4.2.3. - Identification par lecture optique de badges :

Le répondeur est alors constitué d'un badge, constitué d'une série de raies verticales alternativement réfléchissantes et absorbantes ou de couleurs différentes. Ces badges sont analysés par un faisceau lumineux émis par un "lecteur" situé au bord de la chaussée.

Ce dispositif est utilisé pour reconnaître les autobus dans certains postes de péages sur des autoroutes américaines.

1.5. - Matériels d'enquête :

1.5.1. - Les compteurs

L'appareil le plus utilisé pour les enquêtes de trafic est, à coup sûr, le compteur qui, associé avec un détecteur de passage de véhicule, permet d'enregistrer les débits passant sur une chaussée donnée. Il en existe plus de 5.000 en France, répartis dans les différents services des Ponts et Chaussées.

- Actuellement, la plupart de ces compteurs sont encore de type électromécanique : le signal issu du détecteur est envoyé sur un relais qui fait progresser une série de roues à cliquet représentant les unités, dizaines, centaines et milliers de véhicules. On peut ainsi totaliser le nombre de véhicules passant sur une période donnée (5, 15, 30 minutes ou 1 heure par exemple) que l'on peut choisir. Ce nombre est imprimé à la fin de chaque période sur un rouleau de papier.
Le dépouillement de ces rouleaux est évidemment très fastidieux.
- Un premier progrès introduit il y a quelques années a été la lecture automatique de ces bandes par procédé optique.
- Ces dernières années sont apparus des compteurs électroniques enregistrant les débits sous forme digitale :
 - soit sur cassettes numériques,
 - soit dans des mémoires statiques que l'on peut "vider" périodiquement sur une bande magnétique à l'aide d'un dispositif portable mis à la disposition des services exploitants.

.../

1.5.2. - Enquêtes diverses

En dehors des mesures de débits, qui sont fondamentales pour l'ingénieur de trafic, il existe de nombreux besoins d'enquêtes :

- enquêtes "origine destination"
- enquêtes "temps de trajet".

Ces enquêtes se pratiquent en faisant enregistrer par des enquêteurs le numéro minéralogique d'un véhicule passant en certains points d'un réseau ou d'un itinéraire.

La comparaison des données recueillies par divers enquêteurs permet de déduire des informations sur le trajet des véhicules qui ont pu être saisis plusieurs fois.

Ces enquêtes se font souvent par magnétophone, et le dépouillement en est très fastidieux.

- Un coffret a été mis au point récemment par l'I.R.T., comprenant un clavier numérique et un microprocesseur avec sa mémoire, pour permettre la saisie simultanée sur cassette numérique de parties de numéros minéralogiques et de l'instant de passage de véhicules.
- L'évolution des techniques de reconnaissance automatique de la parole devrait par ailleurs permettre prochainement de dépouiller automatiquement des bandes de magnétophone enregistrées oralement.

.../

2 - LES CAPTEURS DANS LE DOMAINE FERROVIAIRE

Dans le domaine ferroviaire, du fait que la circulation se fait sur une seule dimension, et que l'exploitant est le maître des véhicules en circulation, la panoplie des mesures nécessaires à l'exploitation est beaucoup moins étendue que dans le domaine routier. En outre, cette panoplie peut se répartir entre le sol et les véhicules.

On retrouve cependant les grandes rubriques que l'on a évoquées dans le chapitre précédent.

Toutefois, la grande différence avec le domaine routier est la nécessité de concevoir la plupart de ces dispositifs en sécurité, c'est-à-dire de telle sorte qu'un mauvais fonctionnement se traduira toujours par une indication ou une action allant dans le sens de la sécurité, et produisant en général l'arrêt des trains.

Nous allons évoquer 3 types de détecteurs :

- détection de présence en vue d'assurer notamment la sécurité anti-collision, ainsi que la localisation des véhicules ;
- détection de vitesse ;
- identification de trains ou de wagons.

2.1. - Détection de présence

2.1.1. - Les circuits de voie

Le principe général de la sécurité ferroviaire consiste à découper la voie en "cantons", dont la longueur est fonction des vitesses et des capacités de freinage des trains sur cette voie, et d'interdire par une signalisation appropriée, à tout train, l'accès d'un canton déjà occupé par un autre train.

.../

La détection d'occupation de cantons se fait par ce qu'on appelle des "circuits de voie".

- Les premiers circuits de voie utilisaient le fait que les rails étaient posés par tronçon relativement courts que l'on pouvait isoler les uns des autres (fig. 26)

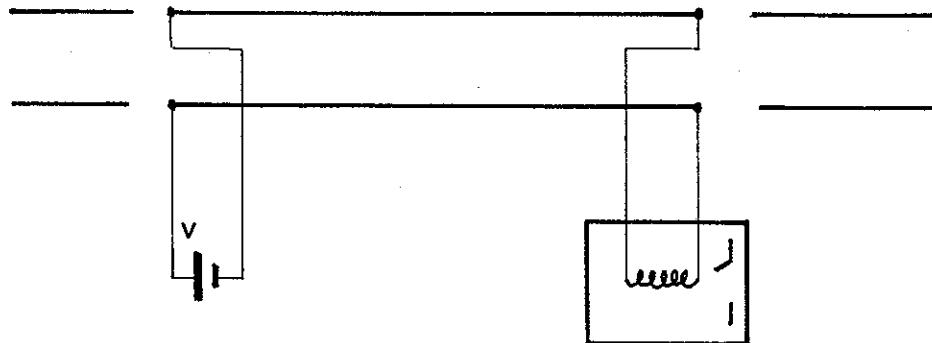


Fig 26

Il suffisait de connecter l'une des extrémités du tronçon à une source de tension, et de brancher un relais à l'autre extrémité. La présence d'un essieu sur le tronçon shuntait le relais qui retombait dans sa position repos.

- Actuellement, les rails sont généralement soudés, ce qui a conduit à la conception de "circuits de voie sans joints".

Nous allons présenter l'un des principes adoptés pour ces dispositifs (fig 27).

.../

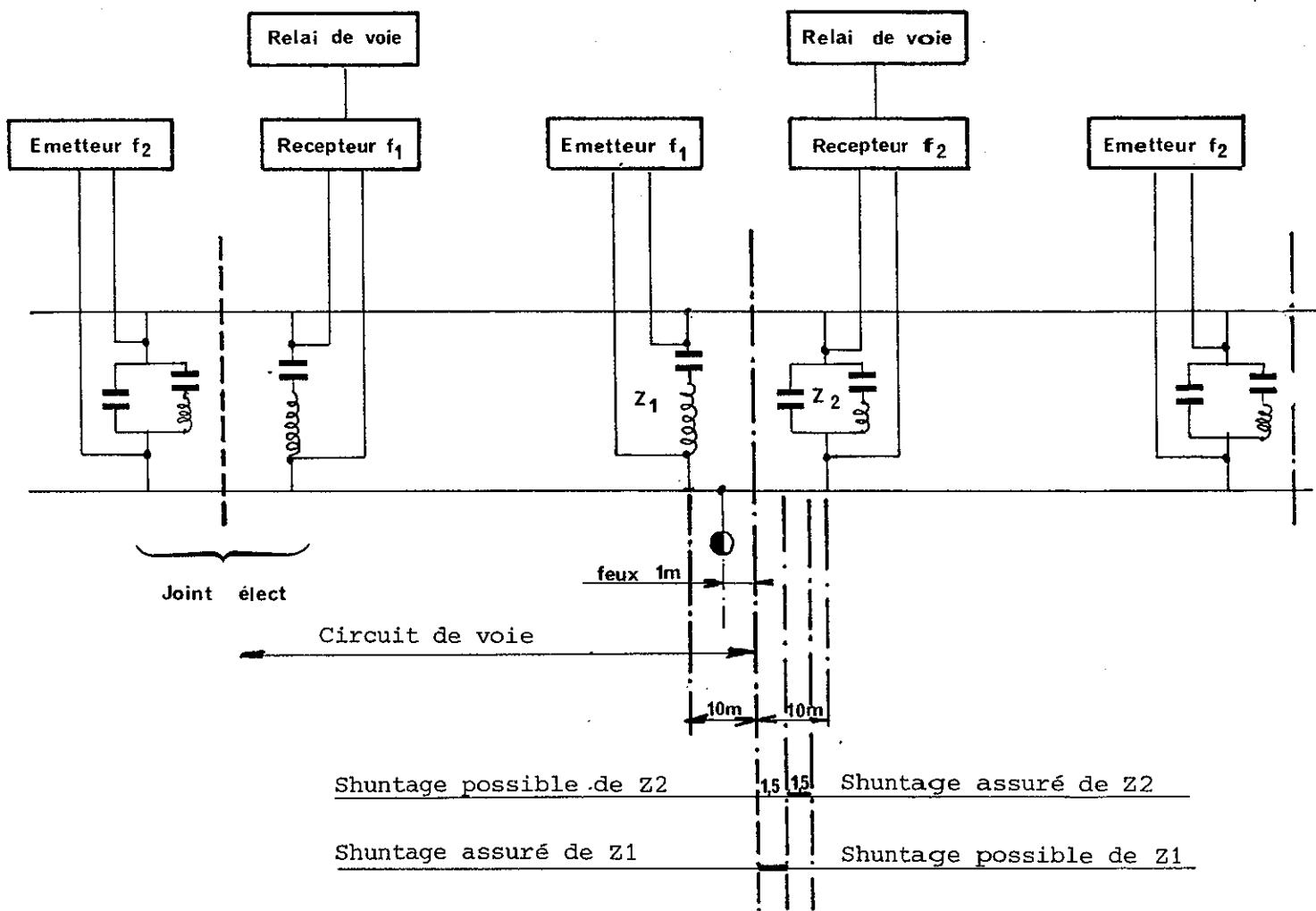


Fig 27 - Circuit de voie sans joint

Le principe consiste à utiliser des circuits "bouchons", fonctionnant alternativement aux fréquences f_1 et f_2 , qui ont pour objet :

- d'empêcher la fréquence d'un circuit de voie donné de se propager en dehors de celui-ci,
- de court circuiter la fréquence du circuit de voie adjacent.

Dans ce cas également, le passage d'un essieu court-circuite le récepteur du circuit de voie et provoque l'apparition d'un signal d'occupation de ce circuit.

.../

- Dans le cas de trains sur pneus, ces dispositifs de circuits de voie ne peuvent fonctionner.
- On fait alors appel en général à des systèmes "actifs" dans lesquels le train émet une certaine fréquence en bande HF, qui est captée par des antennes formées de boucles situées sur la voie.

2.1.2. - Pédales électromécaniques ou électroniques

Une pédale électromécanique est un appareil placé le long du rail et comportant un bras mobile pouvant être actionné par le boudin de la roue. Cette action a pour but de fermer ou d'ouvrir certains contacts intervenant dans les circuits de signalisation.

figure 1 : exemple

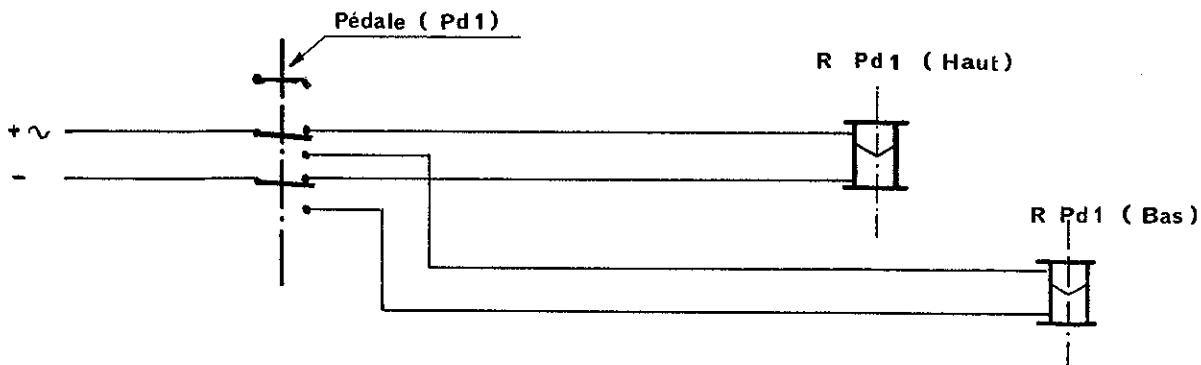


Fig 28

Il existe deux types de pédales, pédale non orientée et pédale orientée, suivant que l'action de la roue est efficace quel que soit le sens de circulation ou, au contraire, uniquement dans un sens bien déterminé.

.../

Pour pallier les inconvénients résultant des manœuvres brutales (et répétées) subies par les pédales de type électromécanique, la S.N.C.F. a développé et mis au point des pédales du type électronique, dont le principe de fonctionnement est le suivant (voir figure 2) :

figure 2

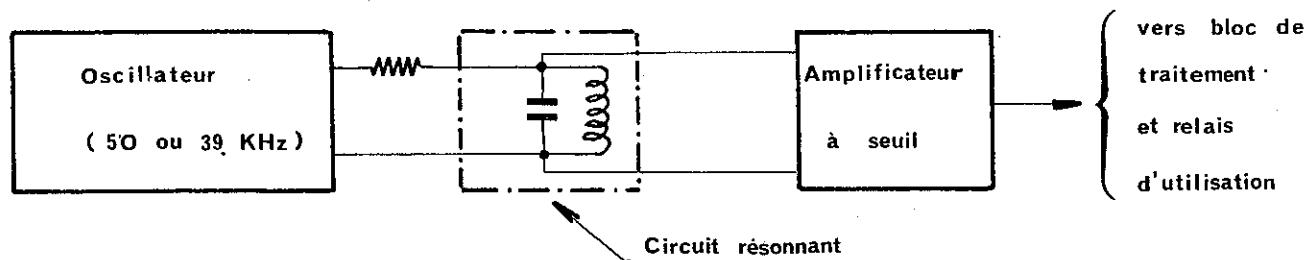


Fig 29

Chaque détecteur comporte un oscillateur de fréquence élevée (50 ou 39 kHz) fonctionnant en permanence et débitant sur un circuit résonnant (self et capacité en parallèle), dont l'impédance varie très sensiblement à chaque passage de roue, ce qui, grâce à un amplificateur à seuil, entraîne la disparition du signal de sortie. Un circuit ferrite en forme de U, placé à la partie supérieure du détecteur, lui-même disposé à l'intérieur de la voie à côté du rail, constitue la "tête de lecture" sensible au passage des roues.

Ces pédales ont de multiples applications. Nous en citerons deux :

- annonce de l'arrivée d'un train à un passage à niveau ;
- localisation des trains dans les systèmes de "suivi de trains", en complément de circuits de voie.

2.1.3. - La mesure de vitesse

La mesure de la vitesse sert surtout à bord des trains pour permettre au conducteur de respecter son horaire, ou, dans les systèmes automatiques, pour régler les commandes des moteurs en fonction des consignes affichées sur la voie.

Cependant, on peut être amené à faire des mesures de vitesse à partir du sol, par exemple pour déclencher des dispositifs de freinage de wagons dans les gares de triage.

2.1.3.1. - Mesure à bord des trains :

- Moyens autonomes : le moyen le plus courant pour la mesure de la vitesse est le comptage de tours de roue par l'intermédiaire de "roues phoniques".

Une roue phonique est généralement constituée d'une roue métallique dentelée (fig 30)

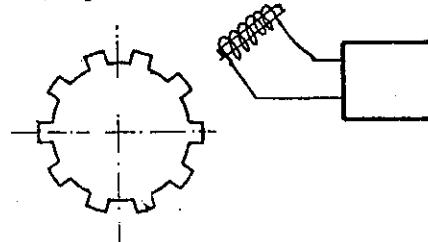


Fig 30 - Roues phoniques

Le passage des dents est détecté par un circuit accordé associé à un compteur et une horloge - il peut être aussi détecté par une cellule photoélectrique.

Un autre moyen courant consiste à utiliser une génératrice tachymétrique.

- Utilisation d'une liaison sol \leftrightarrow train.

Dans de nombreux systèmes de pilotage automatique, la vitesse des trains est obtenue à partir d'une ligne posée sur la voie, alimentée par une tension alternative, et comprenant des croisements à intervalles déterminés (fig 31).



Fig 31

Le train est équipé d'une antenne constituée d'une ou deux bobines qui lui permet de détecter les croisements.

2.1.3.2. - Mesure à partir du sol

Comme dans le domaine routier, on peut utiliser :

- . 2 pédales de détection de présence d'essieux successives
- . des radars à effet Doppler.

2.1.4. - Identification des trains

Des besoins d'identification précise de trains se posent :

- . d'une part pour la régulation des trains dans des zones à fort trafic,
- . d'autre part pour la gestion du parc et notamment du parc de wagons de marchandises.

Citons 3 dispositifs étudiés pour ces besoins :

- Dispositif d'identification des trains sur la ligne R.E.R. de Boissy St-Léger.

Ce dispositif, qui a été conçu pour être intégré dans un système de commande centralisée du trafic, comporte un émetteur hyperfréquence, installé sous la motrice de conduite, et transmettant en permanence sous forme digitale, à la cadence de 100 messages par seconde, un numéro de 10 chiffres caractéristique de la mission du train, de son équipe de conduite et du matériel. Ces messages sont reçus par balises réceptrices situées aux points de départ des trains, et de place en place le long de la ligne.

- Identification automatique des trains de la banlieue Sud-Ouest de la S.N.C.F.

Ce système, destiné à faciliter le travail de la régulation sur les lignes à forte densité de trafic, met en jeu un dispositif d'identification, constitué d'un répondeur électromagnétique comportant 5 oscillateurs réglés sur des fréquences espacées de 15 kHz, de 52,5 kHz à 127,5 kHz, qui permettent de coder un chiffre décimal en choisissant 2 de ces fréquences sur les 5. Ce répondeur est interrogé et en même temps alimenté par un émetteur fonctionnant à 15 kHz, situé le long de la voie.

- Dispositif optique d'identification des wagons de marchandises consistant à analyser, par un faisceau lumineux tournant, des bandes de matériau catadioptrique coloré collées sur les parois des wagons. Ce dispositif est utilisé aux Etats-Unis et au Canada.

III - LES TRANSMISSIONS

1. LES BESOINS

Le schéma de la figure 1 du chapitre I, montre que les transmissions jouent un rôle essentiel dans une installation de régulation du trafic.

Ce schéma fait apparaître 4 types de liaisons :

- liaisons véhicules → capteurs
- liaisons capteurs → P.C.
- liaisons internes au P.C.
- liaisons P.C. → véhicules

Les 2ème et 3ème type de liaisons se retrouvent dans toute installation de régulation industrielle ; toutefois, dans les transports, les liaisons P.C. → capteurs se distinguent par les grandes distances auxquelles se trouvent parfois les capteurs.

Les 1er et 4ème type de liaisons sont spécifiques aux transports.

2 - LES MOYENS

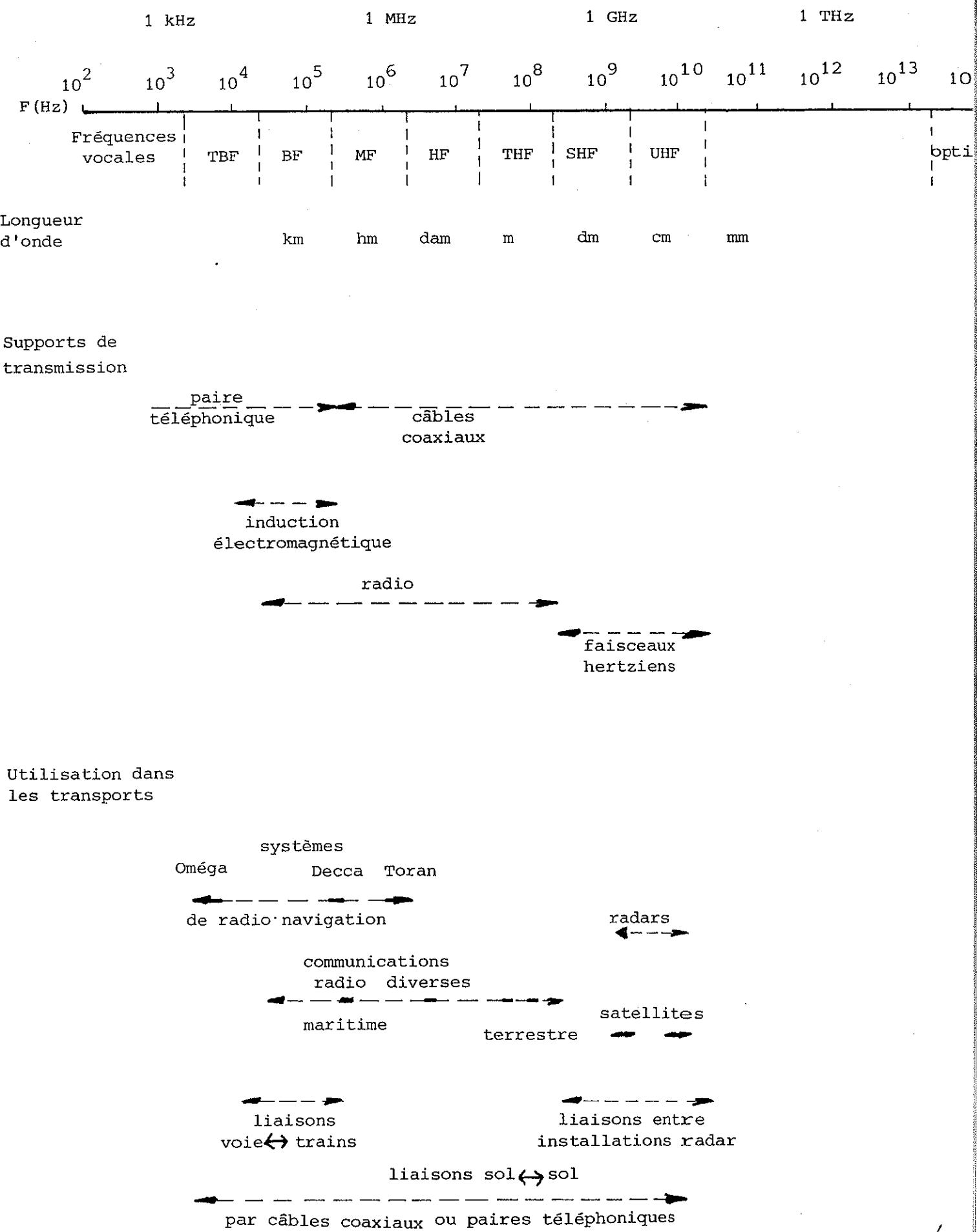
Les transmissions nécessitent un support qui peut être matériel

- câble métallique par exemple - ou immatériel - onde radioélectrique par exemple -

Les règles généralement admises - et conformes aux exigences des P.T.T. qui proscripent pratiquement l'utilisation de liaisons hertziennes entre installations fixes - sont :

- transmission par câbles entre les diverses installations au sol,
- liaisons radio ou liaisons par induction électromagnétique entre véhicules et sol.

.../

Figure 1Spectre Radioélectrique

Toutefois, le spectre des ondes radioélectriques étant, comme chacun sait, extrêmement encombré, le spectre disponible pour les applications dans le domaine des transports est très limité et l'utilisation des liaisons radio est soumise à l'agrément des P.T.T.

Le tableau de la figure 1 montre l'étendue du spectre disponible pour les télétransmissions et les supports utilisables dans les différentes portions de ce spectre.

3 - TYPES DE SIGNAUX A TRANSMETTRE

Il existe 2 grandes catégories de signaux à transmettre :

- Signaux analogiques : ces signaux caractérisent des grandeurs variant de façon continue dans le temps :
 - . grandeurs physiques : température, niveaux de fluides, etc....
 - . émissions phoniques, télévisées.
- Signaux numériques ou tout-ou-rien : ces signaux caractérisent des grandeurs ne pouvant prendre que 2 valeurs : 0 ou 1. Ces signaux servent à transmettre :
 - . des événements isolés : passage d'un véhicule sur un capteur,
 - . plus généralement des messages codés.

Dans les transports, comme dans tous les processus industriels, mises à part certaines liaisons phoniques entre opérateurs, la plus grande partie des transmissions porte sur des échanges de messages avec un ordinateur et se font en numérique.

.../

4 - NOTION DE SPECTRE D'UN SIGNAL

4.1. - Spectre d'une fonction périodique

Rappelons que tout signal périodique $f(t)$ (Fig. 2) de période T peut se décomposer en série de Fourier

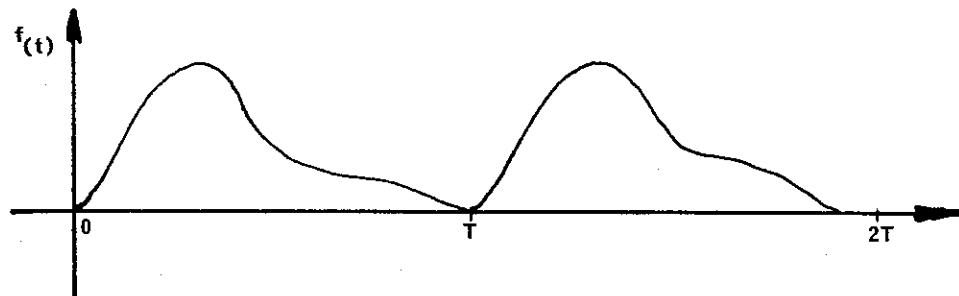


Fig. 2

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ a_n \sin \frac{2\pi n t}{T} + b_n \cos \frac{2\pi n t}{T} \right\}$$

$$\text{avec } a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin \frac{2\pi n t}{T} dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

Les composantes de la forme $a_n \sin \frac{2\pi n t}{T}$ sont les "harmoniques" du signal.
Une telle fonction est parfaitement définie par la donnée des valeurs a_0, a_1, b_1, \dots

ainsi que des fréquences F correspondantes $\frac{1}{T}, \dots, \frac{n}{T}$

ou des pulsations correspondantes $\frac{2\pi}{T}, \dots, \frac{2\pi n}{T}$

On peut par conséquent représenter (Fig. 3) la fonction $f(t)$ dans un plan (amplitude-fréquence), ou (amplitude-pulsation) :

c'est ce que l'on appelle la représentation fréquentielle de la fonction

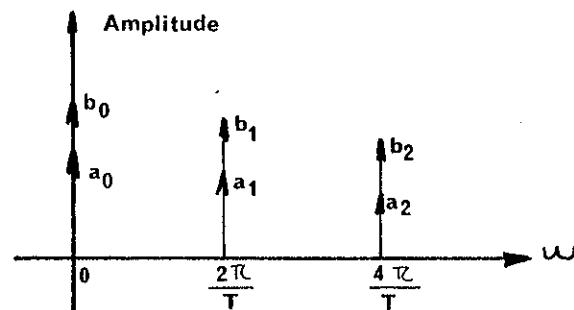


Fig. 3

Cas d'un signal quelconque de durée finie :

Tout signal de durée finie T peut être considéré pour $0 < t < T$ comme la réalisation d'un signal périodique indéfini de période T , et peut par conséquent se développer en série de Fourier de la même façon que la fonction $f(t)$ précédente. Bien entendu cette série de Fourier ne représente le signal que dans l'intervalle $(0 - T)$ puisqu'en dehors de cet intervalle le signal est supposé nul.

4.2.- Spectre d'énergie d'un signal

Dans des phénomènes physiques tels que les phénomènes électriques, l'énergie contenue dans un signal représenté par une tension ou un courant, est proportionnelle au carré de son amplitude.

Si l'on calcule l'énergie de la fonction $f(t)$ sur la période T , on trouve

$$\begin{aligned} E &= \int_0^T f(t)^2 dt = \int_0^T \left\{ a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin \frac{2\pi n t}{T} + b_n \cos \frac{2\pi n t}{T} \right\} dt \\ &= T a_0^2 + \frac{T}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ a_n^2 + b_n^2 \right\} \end{aligned}$$

L'énergie d'un signal est donc la somme des énergies de composants de Fourier de ce signal.

La représentation dans le plan (amplitude-pulsation) de cette grandeur s'appelle le "spectre" du signal (Fig. 4).

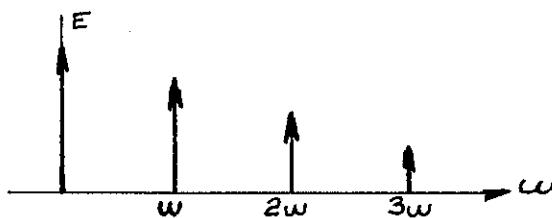


Fig 4

L'étendue du spectre s'appelle la largeur de bande du signal.

Tout signal périodique a un spectre formé de "raies" correspondant aux différentes harmoniques du signal.

Lorsque $T \rightarrow \infty$, les raies de ce spectre se rapprochent, et le spectre devient une fonction continue de ω .

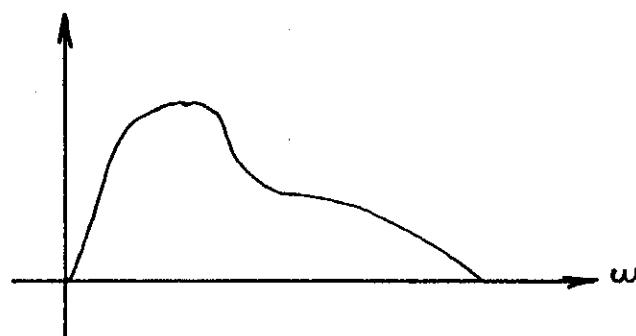


Fig 5

.../

4.3. - Spectre de la parole (fig. 6)

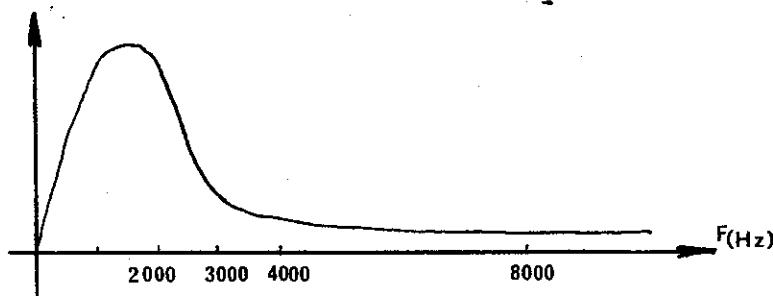


Fig. 6

Ce spectre s'étend de 0 à 15.000 Hz environ.

Cependant dans un circuit téléphonique on peut se contenter de transmettre la partie principale de ce spectre entre 300 et 3.000 Hz : cette partie du spectre suffit pour obtenir une bonne compréhension du message.

4.4. - Spectre de crâneaux périodiques (fig. 7)

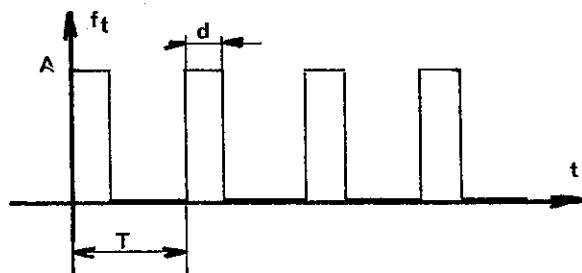


Fig. 7

La décomposition en série de Fourier donne :

$$f(t) = \frac{Ad}{T} + \frac{2Ad}{T} \left\{ \frac{\sin \frac{n\pi d}{T}}{\frac{\pi d}{T}} \cos 2\pi ft \dots \frac{\sin \frac{n\pi d}{T}}{\frac{n\pi d}{T}} \cos 2\pi nft \right\}$$

avec $f = \frac{1}{T}$

Pour $d = \frac{T}{2}$, les termes en $\frac{2k\pi d}{T}$ disparaissent : on trouve les harmoniques $f, 3f, 5f\dots$

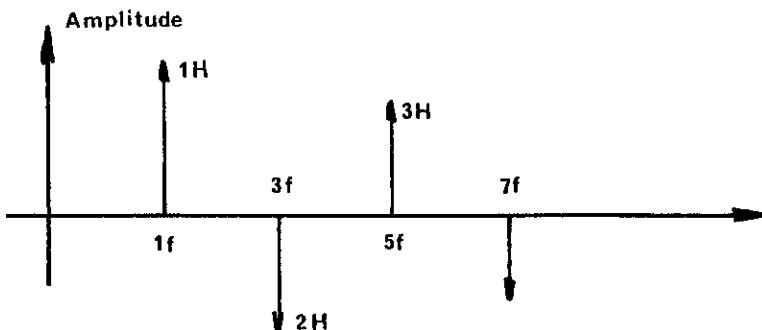


Fig. 8

... /

5 - PROCÉDÉS DE TRANSMISSION - MULTIPLEXAGE

5.1. - Fil à fil ou "bande de base"

C'est le procédé le plus simple, chaque source d'information disposant d'un circuit complet comprenant une paire de fils (fil aller et fil retour) entre un émetteur E et un récepteur R (fig. 9).

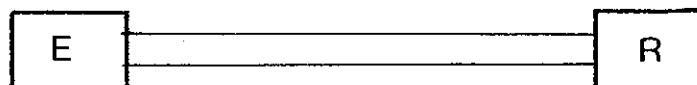


Fig. 9

L'information est représentée :

- soit par l'existence ou l'absence d'une tension ou d'un courant, l'information transmise étant du type tout ou rien (fermeture d'un contact par exemple).
- Dans certains cas on se donne la possibilité d'inverser le sens de la tension ou du courant, ce qui permet d'utiliser 3 niveaux : +V, 0, -V par exemple, pour représenter une information.
- soit par la valeur d'une tension ou d'un courant continu caractérisant une grandeur analogique, ou la phonie.

5.2. - Multiplex de fréquence : utilisation de fréquences "porteuses".

L'information est transmise par modulation d'un signal périodique (fréquence porteuse).

Le multiplex de fréquence consiste à découper la bande de fréquence disponible sur le support choisi en canaux indépendants, centrés chacun sur une fréquence porteuse, et affectés à une voie de transmission élémentaire (fig. 10).

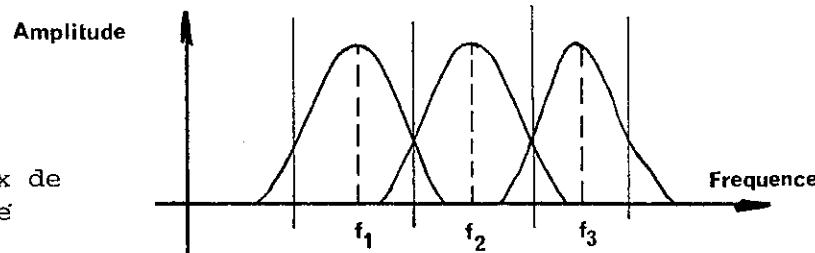


Fig. 10 - Multiplex de fréquence

L'émetteur et le récepteur de chaque voie doivent être très sélectifs. Tout se passe comme si l'on disposait d'autant de voies indépendantes que de canaux ainsi définis.

... /

5.3. - Multiplexage temporel

Une autre méthode pour utiliser un même support pour la transmission d'informations provenant de différentes sources consiste à découper le temps de transmission disponible en une succession d'intervalle dont chacun est réservé à la transmission des informations d'une voie déterminée.

Le principe du multiplex temporel est représenté sur la fig. 11.

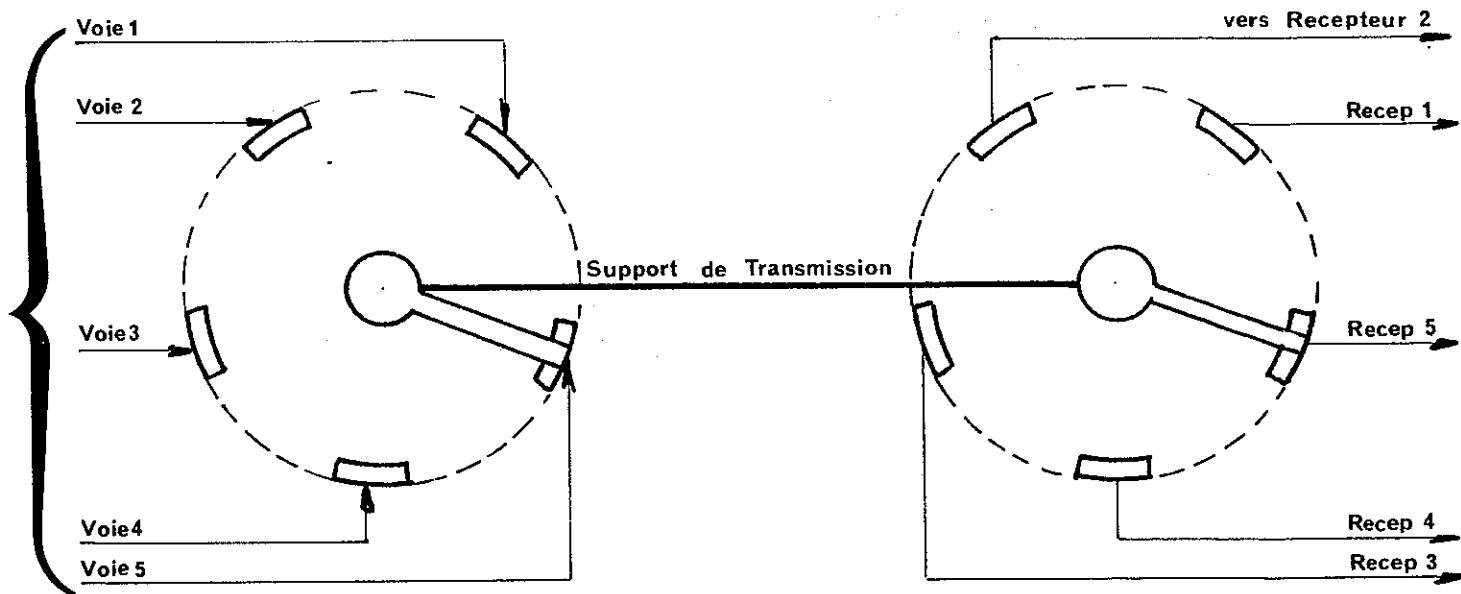


Fig. 11 - Multiplex temporel

Un dispositif de multiplexage s'apparente à un ensemble de 2 commutateurs synchrones situés l'un du côté émission, l'autre du côté réception.

Bien entendu, dans les installations modernes, la commutation se fait de façon électronique, par basculement de circuits à transistors commandés par des horloges.

.../

6 - CAPACITE MAXIMALE D'UN CANAL

Dans les transmissions numériques, on définit la capacité d'un canal par le débit maximal d'informations - exprimé en "bauds" - que ce canal peut véhiculer ; cette information étant en général transmise sous forme de bits, à l'aide d'un signal à 2 niveaux, 0 ou 1 ; dans ce cas, 1 baud = 1 bit/sec.

La capacité d'un canal est proportionnelle à la largeur de bande B, c'est-à-dire du spectre de fréquence que ce canal peut admettre.

La capacité d'un canal idéal, sans distorsion et en l'absence de tout bruit perturbateur, est donnée par la formule de Nigquist.

$$C_{\text{baud}} = 2 B \quad B \text{ largeur de bande (Hz)}$$

Dans la pratique, tout canal de transmission introduit des distorsions et des bruits sur le signal à transmettre, ce qui limite la capacité.

En présence d'un bruit d'énergie N, la capacité d'un canal est donnée par :

$$C_{\text{baud}} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

S étant l'énergie du signal.

7 - METHODES DE MODULATION

Comme on l'a indiqué plus haut, pour transmettre un signal dans un canal matérialisé par une fréquence porteuse, il convient de moduler cette porteuse par le signal à transmettre. A la réception, on procède à l'opération de démodulation permettant d'extraire le signal de la porteuse. Ces opérations de modulation-démodulation sont faites dans des dispositions appelés MODEM.

.../

Il existe plusieurs types de modulation :

7.1. - Modulation d'amplitude

La porteuse étant un courant (dans le cas d'une liaison filaire) ou une onde (dans le cas d'une liaison radio) d'expression :

$$P(t) = A_0 \cos(\omega t + \varphi_0)$$

la modulation d'amplitude consiste à faire varier l'amplitude de cette porteuse à la cadence du signal utile.

- Si l'on transmet une suite de 1 et de 0, l'amplitude prendra alternativement la valeur A_1 associée à 1 et la valeur A_0 (en général 0) associée à 0 (fig. 12).

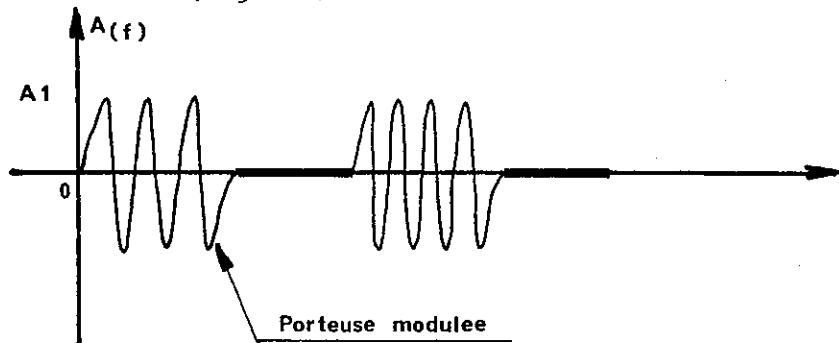


Fig. 12

- Si l'on transmet un signal analogique, c'est la valeur de A qui caractérise le signal (fig. 13).

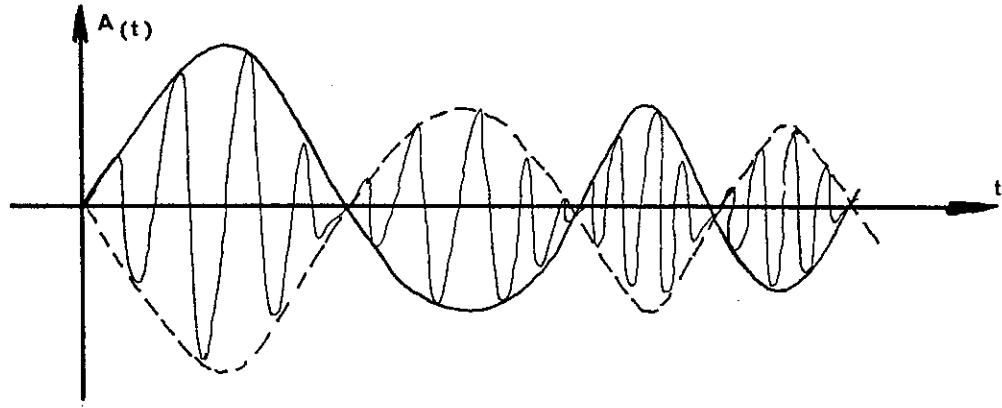


Fig. 13

Ce type de modulation peut être réalisé par des équipements simples et bon marché, mais est sensible aux parasites. Il n'est utilisé que pour des cadences de transmissions faibles (quelques dizaines de bits/sec).

7.2. - Modulation de fréquence

Dans ce type de modulation, on fait varier la fréquence de la porteuse en fonction du signal.

C'est ainsi qu'un signal linéaire pourra être transmis par 2 fréquences F_1 et F_0 associées chacune à une des 2 valeurs 1 ou 0 de l'information (fig. 14). C'est la méthode dite F.S.K., en américain (Frequency Shift Keying).

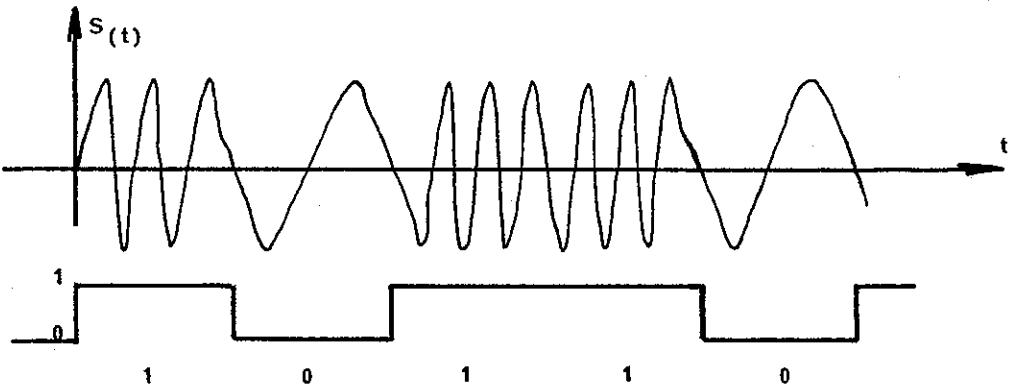


Fig 14

7.3. - Modulation de phase

Dans ce cas, c'est la phase de la porteuse qui varie en fonction du signal : dans une transmission numérique, on provoque des sauts de phase de la porteuse (par ex. 180°) par rapport à la phase initiale (fig. 15).

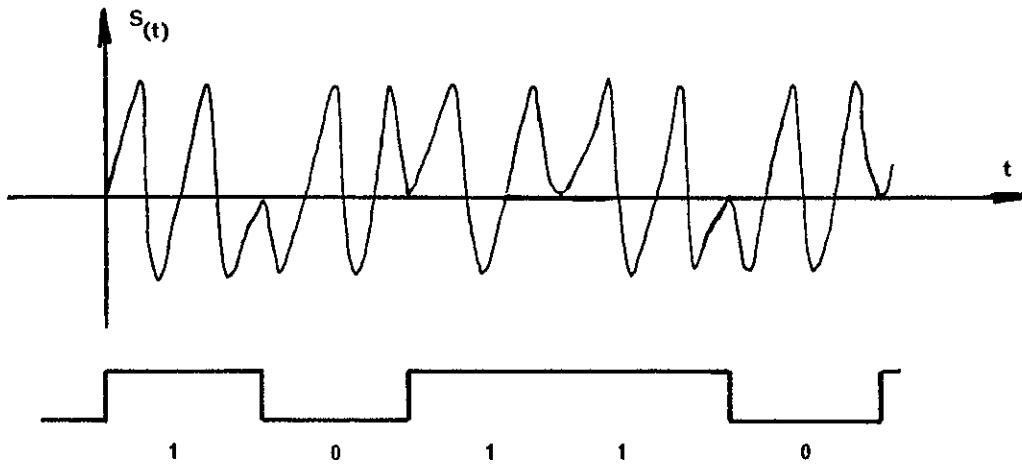


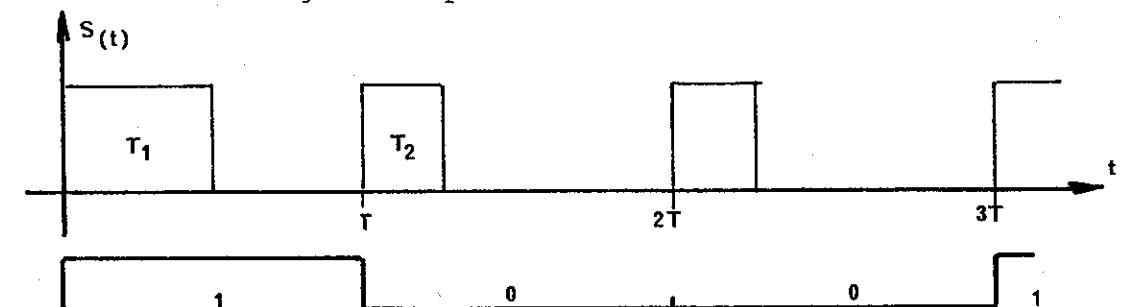
Fig 15

... /

7.4. - Modulation d'impulsion

Cette modulation consiste à représenter l'information soit par des impulsions de largeurs différentes, soit par des intervalles entre 2 impulsions. Ces impulsions résultent généralement d'une modulation en amplitude d'une porteuse.

- modulation de largeur d'impulsion :



1 = impulsion de largeur T_1

0 = impulsion de largeur T_2

Fig 16

- modulation d'intervalles entre impulsions :

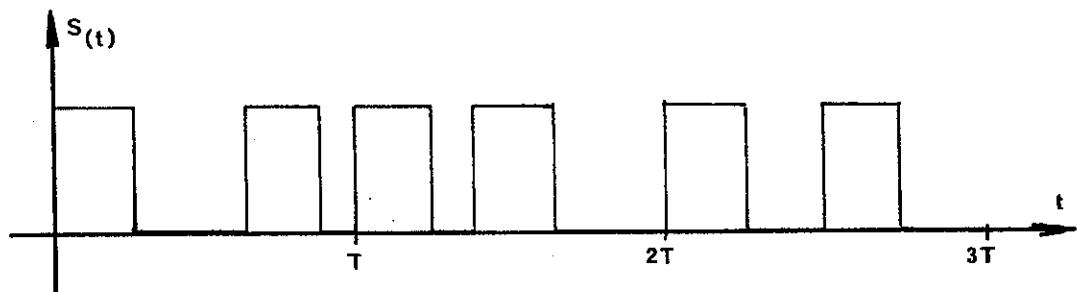


Fig 17

... /

7.5. - Méthodes de transmission numérique en bande de base

Il existe différentes méthodes pour transmettre un signal numérique en bande de base. Nous en illustrons quelques unes sur la fig. 18 :

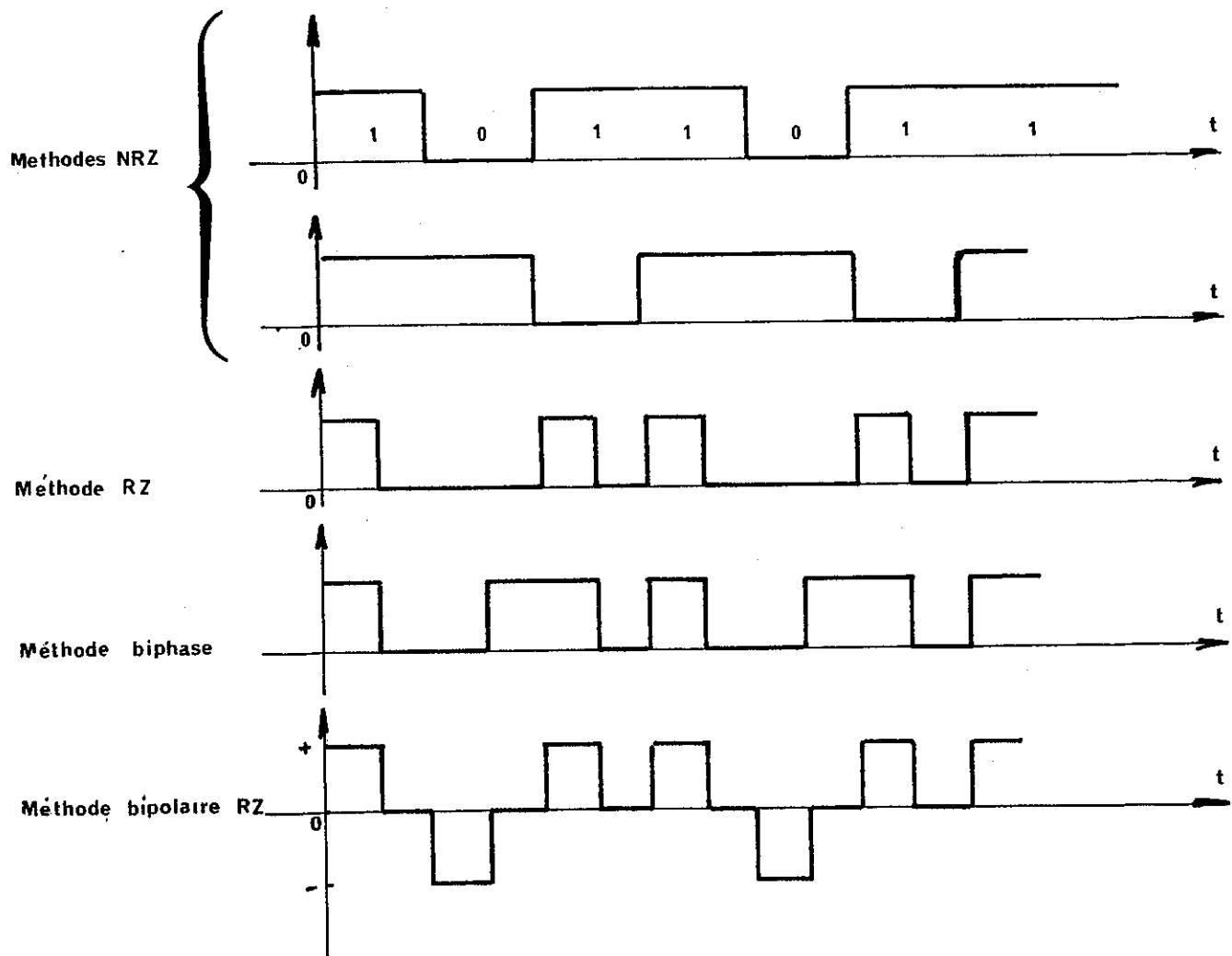


Fig 18

- NRZ - Non return - to zéro
 - soit : 1 = niveau haut 0 = niveau bas
 - soit : 1 = transition ou débit du bit - 0 = pas de transition
 - RZ - return to zéro
 - 1 = impulsion d' $\frac{1}{2}$ période 0 = pas d'impulsion
 - biphase :
 - 1 = changement de niveau haut → bas à mi-période 0 = changement de niveau bas → haut à mi-période
 - bipolaire RZ : ce procédé requiert 3 niveaux +, 0, -
 - 1 = impulsion + sur $\frac{1}{2}$ période 0 = impulsion - sur $\frac{1}{2}$ période

1

8 - CODAGE DE L'INFORMATION

En transmission numérique, toute information est représentée par un signal numérique, c'est-à-dire une série de 0 et de 1.

On appelle code la loi de correspondance entre les informations à transmettre et les configurations binaires associées.

Le code peut être :

- propre à une application : c'est le cas dans les installations de régulation industrielle où l'on transmet des télécommandes ou téléméasures, et où, à la limite, on peut se passer de code lorsqu'on transmet uniquement des positions de contacts de relais.
- standardisé et d'utilisation générale : c'est le cas des applications de téléinformatique ou de télégraphie et de télex.

Dans ces applications, on se préoccupe de transmettre des données correspondant à des caractères (lettres ou chiffres), ainsi que certains signes (+, -, %, (),....etc...) ou certaines commandes (retour chariot, espace,...etc...) permettant par exemple la gestion d'un périphérique.

Citons :

- . le code Morse - bien connu -
- . le code Baudot utilisé dans les télex : code à 5 moments ou code CCITT n° 2.

Il utilise 5 bits d'information par caractère, ce qui permet $2^5 = 32$ combinaisons.

- . le code ASCII (American Standard Code for information interchange). Encore appelé code CCITT n° 5 ou ISO7, il comporte 7 bits utiles ce qui autorise $2^7 = 128$ combinaisons.
- . le code EBCDIC (Extended binary coded decimal interchange code). C'est un code à 8 moments.

.../

9 - SYNCHRONISATION

Un message numérique étant constitué d'une suite de 0 et de 1, cette suite sera représentée en ligne par un signal modulé. La donnée du signal modulé sans autre renseignement permet difficilement de reconstituer la suite initiale. Il manque en effet un élément qui est le cadencement de l'émission (début du signal utile et durée élémentaire du bit), qui permettra de synchroniser la lecture du signal modulé avec la façon dont il a été constitué à l'émission.

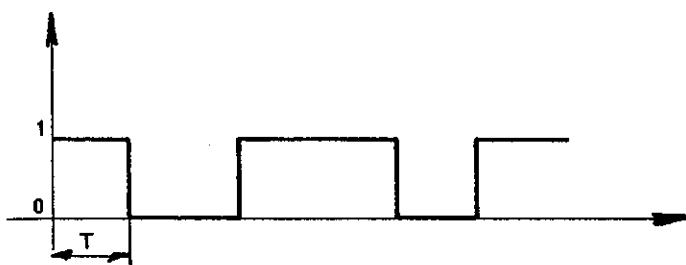


Fig 19

Par exemple le signal ci-dessus (fig 19) peut s'interpréter, soit comme 1 00 1101, soit comme 11 0000 1111 00 11 selon que T est la durée de 1 ou 2 bits. Cette donnée supplémentaire est obtenue de deux façons différentes :

- la transmission est dite asynchrone lorsque les informations de cadencement au niveau du bit ne sont pas reconstituées à partir du message reçu. Dans ce cas, le récepteur dispose d'une horloge réglée à la même cadence que l'horloge de l'émetteur et déclenchée par la réception de la première transition du mot transmis ("start"). Comme les réglages relatifs des deux horloges ne sont pas dans la pratique rigoureusement identiques, la transmission s'effectue par mots relativement courts précédés chacun d'un start qui rétablit un certain synchronisme.

On utilise généralement des mots de 8 bits utiles précédés d'un bit de start et suivis d'un bit de parité et d'un ou deux bits de stop.

Ce type de transmission est bien adapté à la transmission à faible vitesse (jusqu'à 9 600 bits par seconde, les problèmes de différence de réglage entre horloge devenant de plus en plus contraignants lorsqu'on augmente la vitesse) de messages courts (pour 8 bits utiles on transmet 10 à 11 bits réels, l'efficacité est donc faible) ;

.../

- la transmission est dite synchrone lorsque les informations de cadence au niveau du bit sont reconstituées à partir du message reçu.

Cette reconstitution de la cadence bit peut s'effectuer soit à l'aide d'une voie de transmission différente de la voie sur laquelle sont transmises les données et sur laquelle sont transmises les transitions d'horloge, soit par utilisation des transitions présentes dans le message.

Généralement, on utilise les transitions présentes dans le message.

Pour permettre la synchronisation de l'horloge du récepteur sur celle de l'émetteur chaque message, quelle que soit sa longueur, est précédé d'une séquence de plusieurs bits ou même plusieurs caractères de synchronisation. Ensuite, l'horloge du récepteur se resynchronise à chaque transition.

Pour pallier le cas des messages comportant de longues suites de 0 ou de 1 (donc sans transition), on utilise généralement (et c'est toujours le cas lorsque la transmission est rapide) un codage au niveau du bit qui permet d'avoir des transitions suffisamment proches pour qu'il n'y ait jamais perte de synchronisme. C'est le cas par exemple de code biphase ou bipolaire RZ (fig. 18).

D'une façon générale, la transmission synchrone est bien adaptée à des transmissions rapides de messages longs (quelque soit le nombre de caractères utiles du message, on lui adjoint le même nombre de caractères de synchronisation).

.../

10 - PROTECTION CONTRE LES ERREURS

Comme on l'a vu, les messages sont sensibles à différents parasites qui peuvent transformer aléatoirement un bit 1 en un bit 0, ou vice-versa, et par conséquent modifier le sens du message.

Les méthodes de protection contre les erreurs ont pour but d'arriver à transmettre l'information sans erreur et surtout d'éviter de considérer comme correcte une information reçue erronnée.

La protection contre les erreurs s'exerce :

- au niveau de la constitution des messages transmis,
- au niveau de l'interprétation des messages reçus et des procédures de reprise sur erreur.

Un message est une suite de caractères organisés d'une façon propre à l'application. Par exemple : adresse du destinataire, type de message, contenu du message, caractères de contrôle.

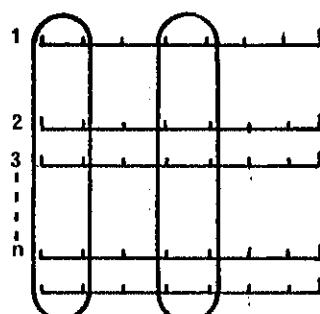
Les contrôles introduits au niveau de la constitution des messages sont généralement de l'un des types suivants :

- parité transversale : à chacun des caractères de k bits (souvent $k = 8$), est associé un bit supplémentaire dit de parité : si l'on travaille en parité "paire" ce bit aura la valeur nécessaire pour que le nombre total de bit 1 soit pair. En parité impaire ce sera le contraire.

Ce type de contrôle est souvent associé avec l'un des contrôles suivants.

Il permet de détecter les erreurs simples et celles qui sont en nombre impair

- parité longitudinale ou verticale : le contrôle de parité s'effectue sur un ensemble de caractères en ajoutant un caractère supplémentaire assurant la parité (ou l'imparité) sur chacun des bits de l'ensemble des caractères.



bits assurant la parité verticale sur
les bits de même rang des différents caractères

Fig 20

Associé à la parité transversale, ce type de contrôle est largement suffisant dans la plupart des applications. Il est souvent utilisé dans la transmission de données en ASCII :

- codes de redondance cyclique

Ce type de contrôle consiste à ajouter r bits au message. Le calcul de ces bits fait intervenir une représentation polynomiale du message et une division du message par un polynôme générateur de degré r .

On utilise souvent des polynomes générateurs de degré 16. Les bits ajoutés sont appelés CRC (cyclic redundancy code).

Ce type de contrôle est bien adapté à la détection de paquets d'erreurs. Il est surtout utilisé dans le cas de longs messages binaires purs.

- autres contrôles

Il existe de nombreux autres types de contrôle. On a également développé des codes correcteurs d'erreur qui permettent, dans une certaine mesure, de recalculer les bits erronés.

Il faut de toutes façons se souvenir qu'aucun code n'est parfait et qu'un code est d'autant plus coûteux (en bits à transmettre et en matériel ou logiciel) qu'il est élaboré.

Les contrôles introduits au niveau de l'interprétation des messages reçus sont essentiellement les suivants :

- lorsqu'on utilise un codage des données (ASCII, EBCDIC) etc.... on peut contrôler que le caractère reçu est un mot du code, sinon il s'agit d'une erreur ;
- on peut, d'autre part, contrôler la cohérence interne du message reçu. Ce contrôle dépend de l'application et du type de message.

.../

Les procédures concourent également à la sécurité de transmission :

- en permettant de n'entreprendre une transmission que lorsque le récepteur est prêt à recevoir : ligne établie, récepteur localisé et disponible pour recevoir ;
- en assurant les reprises sur erreur, plusieurs solutions existent à ce niveau :
 - . répétition systématique des messages et prise en compte uniquement si plusieurs envois sont identiques ;
 - . accusé de réception et répétition si erreur.

11 - COMPARAISON DES DIFFERENTS SUPPORTS DE TRANSMISSIONS

Nous avons présenté dans le tableau de la fig. 21, sous forme très qualitative, les résultats d'une comparaison des différents supports que nous avons cités en fonction de quelques critères :

- Sécurité - insensibilité aux parasites
- Capacité
- Facteurs économiques (liés au coût d'installation)

	Sécurité	Capacité	Economie (au niveau du coût d'installation)
Fil	XX	X	X
Câbles coaxiaux	XXX	XXX	X
Radio	X	XX	XXX
Faisceaux hertziens	XX	XXX	XX
Fibres optiques	XXX	XXX	X

Fig 21

.../

Commentaires

- a) Le fil est un moyen relativement sûr de transmission, mais il est sensible tout de même à un certain nombre de défauts :
- . diaphonie : interférences entre fils groupés dans un même câble ;
 - . distorsions dues au fait que les différentes fréquences du spectre sont différemment affaiblies au passage dans un fil ;
 - . affaiblissements dus aux chutes ohmiques, et à la présence de selfs et capacités parasites.
- b) De tous les moyens, la radio est le moins sûr : d'une part on y trouve les défauts de diaphonie entre canaux et d'affaiblissement avec la portée, signalés pour les fils ; d'autre part, elle est sujette à des défauts de masquage par des bâtiments ou des obstacles naturels, et à des phénomènes de "chemins multiples" dus à des réflexions sur les obstacles qui peuvent créer des interférences néfastes sur un signal donné.
- c) En matière d'économie, le fil ordinaire est moins coûteux que le câble coaxial ou la fibre optique ; cependant, la dépense principale lorsqu'on utilise ces supports provient essentiellement des coûts de génie civil nécessaires pour leur installation.

12 - DOMAINES D'APPLICATION DE TRANSMISSIONS INFRASTRUCTURE ↔ VEHICULES
DANS LES TRANSPORTS

Les principaux domaines d'application de transmissions infrastructure ↔ véhicules dans les transports terrestres sont :

12.1. - La liaison voie ↔ trains dans les transports guidés.

Ces liaisons peuvent être réalisées :

- de façon continue, le support de transmission pouvant être :

- . les rails, avec 2 modes de transmission :
 - * par contact, grâce à des frotteurs (ex : phonie du métro)
 - * par couplage inductif (ex : TGV)
 - . des câbles ou des boucles placées le long de la voie, la liaison s'effectuant par couplage inductif (ex : VAL - Métro de Lyon)
 - . la radio, surtout utilisée en espace découvert, dans les chemins de fer, ou les lignes aériennes de métro (RER par exemple),
- de façon ponctuelle, par des balises placées en des points particuliers de la voie, par exemple aux stations.

12.2. - Les liaisons avec les autobus sur un réseau urbain :

On trouve :

- des liaisons phoniques par radio téléphone dans des bandes VHF (250 MHz environ),
- des liaisons numériques en VHF également dans les systèmes d'aide à l'exploitation des autobus (SAE), dans lesquels la position des autobus, mesurée par un comptage de tours de roues, est envoyée à intervalles réguliers vers un PC sur interrogation de ce PC.

12.3. - La radio-téléphonie mobile entre des stations PTT et des véhicules routiers

Actuellement, les PTT desservent les grandes villes françaises et leur périphérie à l'aide d'un réseau de stations travaillant en VHF (dans les bandes proche de 200 MHz et 400 MHz).

La tendance de ces réseaux pour l'avenir serait de monter dans l'échelle des fréquences jusqu'à 900 MHz afin de trouver davantage de canaux disponibles.

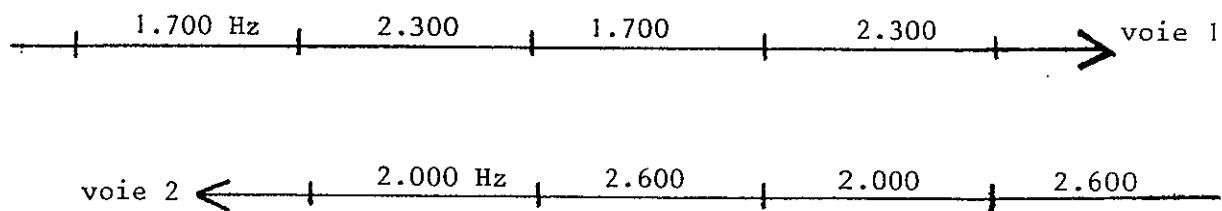
12.4. - L'information routière : ce domaine est évoqué au chapitre suivant.

13 - QUELQUES EXEMPLES DE CES APPLICATIONS

13.1. - Transmission voie → TGV

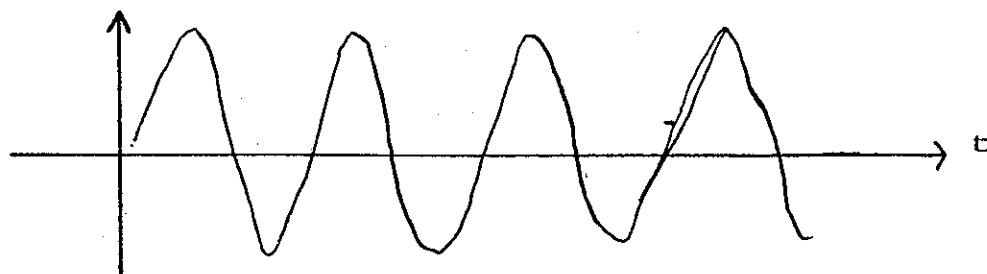
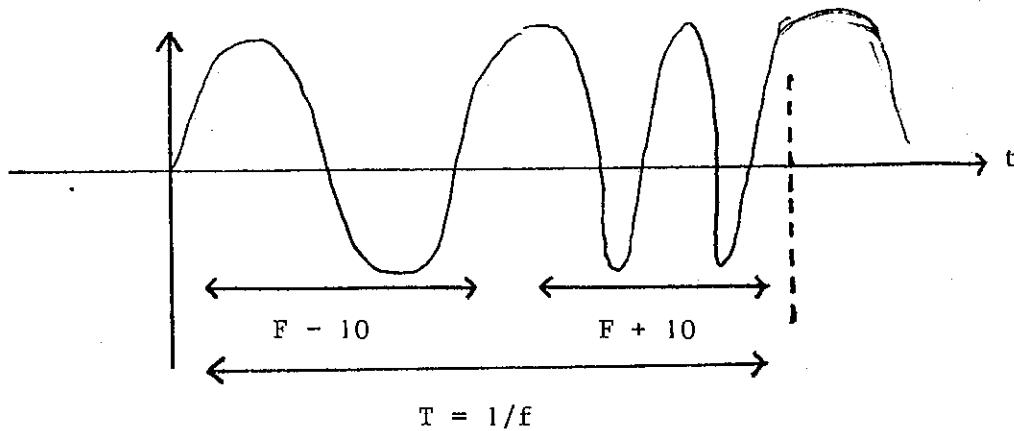
Cette transmission, qui a pour objet de transmettre des consignes de vitesse ou d'arrêt aux trains, se fait par les rails, par l'intermédiaire des circuits de voie.

4 fréquences sont utilisées, conformément au schéma suivant, afin d'éviter les interférences entre circuits de voie voisins



Le type de modulation utilisé pour le codage des messages consiste à décaler régulièrement la fréquence de base de 10 Hz, puis de + 10 Hz, avec une périodicité $T = 1/f$, f pouvant varier de 10,3 à 29 Hz.

C'est la valeur de f qui caractérise l'information à transmettre.

(a) Fréquence F de base du circuit de voie

Dans ce système de transmission, il a été prévu la possibilité de coder 18 informations différentes, dont 11 sont actuellement utilisées.

13.2. - Transmission du VAL

Les transmissions voie \longleftrightarrow véhicule dans le VAL se font par l'intermédiaire de câbles formant des boucles placées sur la voie, et constituant ce que l'on appelle le "tapis pilote".

On a résumé dans le tableau suivant les principales fréquences et les types de modulations utilisées :

... /

LES TRANSMISSIONS DANS LE VAL

LIAISON	Voie ↓ véhicule	Véhicule ↓ Voie	F (KHz)	MODULATION	OBSERVATIONS
Présence véhicule		X	69	non	
Programmes V					
- normal	X		42	Modulation de φ	
- perturbé	X		33		
Liaison voie véhicule			135		
- données	X			FSK s/ sous- porteuse 5,5 kHz	débit 192 bps
- voix	X				
Etat véhicule		X	80	Modulation ampli- tude	RZ - 384 bps
Phonie véhicule		X	100	Modulation de φ	
Liaison station véhicule	X		36,25	FSK	254 bps
Liaison véhicule station		X	55,25	FSK	128 bps

(1) 2 groupes de fréquence audio : { f1 (572 Hz) programme normal
 { f2 (463,5 Hz) programme perturbé
 { f3 (405,5 Hz) accostage
 { f4 sens 1
 { f5 sens 2

... /

13.3. - Répétition ponctuelle de la signalisation à bord des trains

Il existe de nombreux systèmes de type inductif servant à la répétition de la signalisation à bord des motrices. Nous en citerons deux :

- Le système INDUSI de la DB (Deutsches Bundesbahn).

Ce système met en oeuvre :

. à bord de la motrice 3 circuits oscillants accordés respectivement sur :

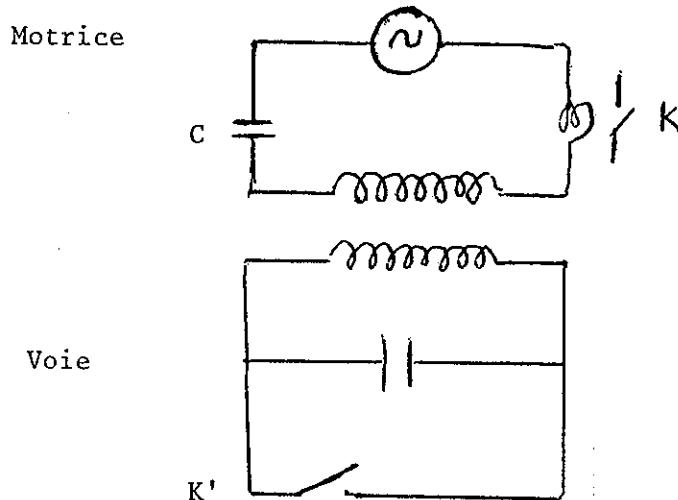
1.000 Hz (correspondant à des signaux d'avertissement)

2.000 Hz (correspondant à des signaux principaux d'arrêt)

500 Hz (correspondant à une pré-annonce de signaux principaux)

. sur la voie, au droit du signal, un circuit oscillant passif accordé sur l'une de ces fréquences, suivant la nature du signal, et mis en service par coupure d'un interrupteur K' .

L'activation du signal entraîne la coupure de K' , et l'activation de ce circuit résonant. Lorsque la motrice passe au-dessus, ce circuit crée un effet de résonance sur le circuit correspondant de la motrice, et la chute d'un relais K qui permet d'activer soit une signalisation en cabine, soit une manœuvre de ralentissement ou d'arrêt.



- Le système de répétition des trains à grande vitesse, type "PARIS-BORDEAUX" de la SNCF, utilise :
 - . dans la motrice, une bobine reliée à un ampli apériodique et un récepteur,
 - . sur la voie, un circuit oscillant pouvant être accordé sur 5 fréquences différentes, correspondant à l'état du signal auquel il est associé :

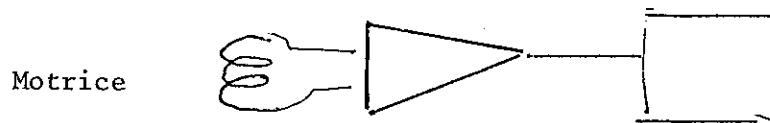
92 kHz : feu vert

86,5 kHz : pré-annonce (vert clignotant)

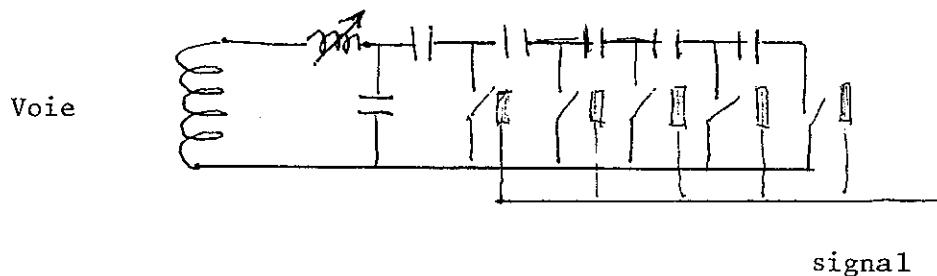
81,5 kHz : avertissement (jaune)

78 kHz : feu rouge

98 kHz : dérangement



Réception



13.4. - Envoi de signaux d'identification des trains

Il existe de nombreux systèmes utilisant une liaison radio, en général dans une bande VHF ou UHF entre les trains et une balise réceptrice située sur la voie pour transmettre un numéro d'identification d'un train ou tout autre message vers la voie.

Ex : identification des motrices du RER,

identification des trains de banlieue de la ligne PARIS SUD OUEST.

IV - SIGNALISATION ET COMMUNICATION AVEC LES CONDUCTEURS

La troisième composante importante d'un système de régulation, qui apparaît sur la figure 1 du chapitre I, est la liaison avec les conducteurs.

Cette liaison s'est effectuée pendant très longtemps – aussi bien dans le domaine routier que dans le domaine ferroviaire – à l'aide de dispositifs de signalisation extérieurs : feux ou panneaux de signalisation.

A l'origine, cette signalisation avait surtout des objectifs de sécurité :

- protection contre les collisions aux carrefours pour le trafic routier.
- protection contre les collisions et contre les risques de déraillement pour le trafic ferroviaire.

Cependant peu à peu, avec l'apparition de phénomènes de saturation des infrastructures, on a réalisé que la signalisation pouvait contribuer à une meilleure utilisation de ces infrastructures, et améliorer à la fois la fluidité et la régularité du trafic.

La signalisation extérieure s'est révélée insuffisante pour répondre à ces nouveaux objectifs ; par ailleurs, elle n'est pas bien adaptée aux très grandes vitesses.

Aussi, la tendance actuelle est-elle de compléter cette signalisation externe par une information – visuelle ou sonore – interne aux véhicules.

Dans le présent chapitre, nous allons passer en revue les moyens de liaison existant avec les conducteurs, d'abord dans le domaine ferroviaire, puis dans le domaine routier.

.../

1 - LA SIGNALISATION FERROVIAIRE

Nous citerons pour mémoire les signaux optiques manuels (drapeaux, guidons ou lanternes), et les signaux acoustiques (pétards) employés dans des circonstances très particulières, et nous traiterons essentiellement :

- de signaux fixes,
- de la signalisation interne aux cabines de conduite ("cab-signal").

1.1. - Les signaux fixes

Ces signaux assurent principalement :

- la protection des gares et bifurcations,
- la commande de ralentissements,
- la protection contre les collisions en file.

Ces signaux sont maintenant tous constitués de feux lumineux ; cependant, on rencontre encore beaucoup de signaux à "cocarde" qui étaient utilisés autrefois de jour.

1.1.1. - Protection des gares et bifurcations :

Sur les voies principales, ces signaux comprennent 2 feux rouges sur une ligne horizontale ou verticale.

De jour, ils peuvent comporter 1 cocarde carrée à damier rouge et blanc qui, à voie libre, est effacée parallèlement à la voie (fig. 1).

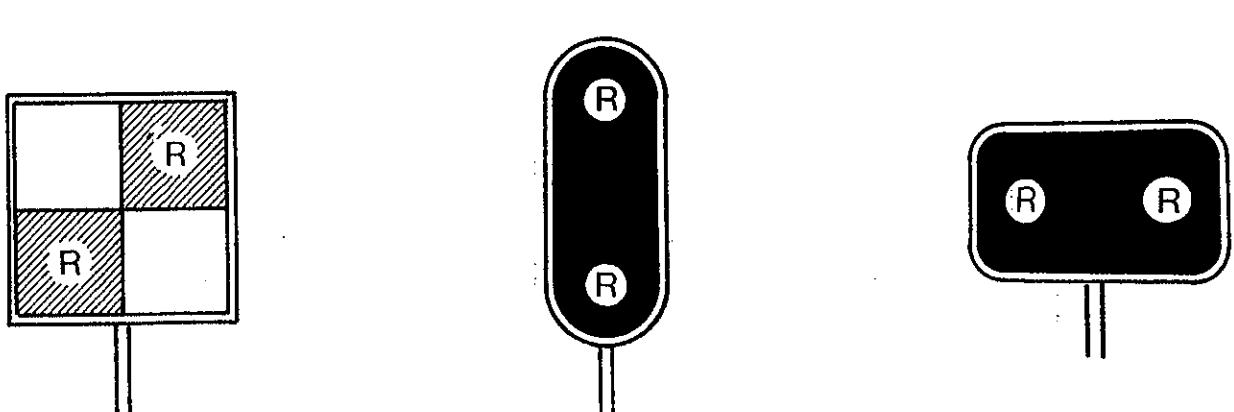


Fig. 1

Le mécanicien doit s'arrêter avant ces signaux qui sont précédés à distance par un signal d'avertissement constitué d'un feu jaune, et éventuellement, le jour, d'une cocarde jaune en forme de losange (fig. 2).

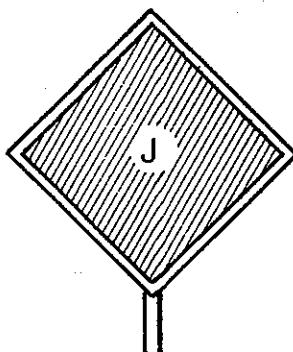
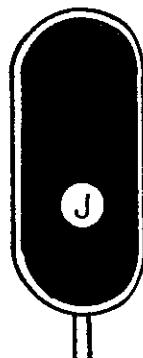


Fig. 2



Sur certaines installations de block automatique, il existe en outre un signal de préavertissement constitué d'un feu jaune clignotant.

Enfin sur les lignes à vitesse supérieure à 160 km/h, l'approche d'un avertissement fermé est annoncée par le clignotement du feu vert.

Les voies de service sont équipées de signaux spécifiques :

- . feu pourpre et éventuellement cocarde carrée violette de jour.
Il existe enfin une signalisation commandant au mécanicien de se mettre en marche à vue (fig. 3) ;
- . feu rouge et feu jaune sur une ligne horizontale et éventuellement cocarde circulaire rouge de jour.

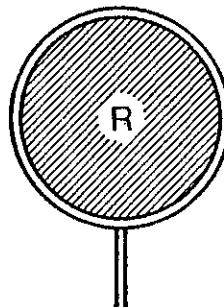
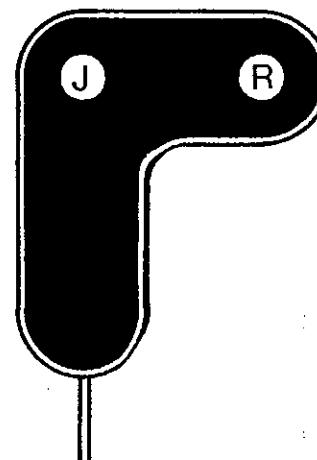


Fig. 3



.../

1.1.2. - Signaux de ralentissement

Ces signaux sont destinés à protéger :

- les approches des appareils de voie,
- les zones de travaux,
- les courbes nécessitant un ralentissement.

Ces signaux ont des présentations différentes suivant les cas :

1.1.2.1. - Protection d'appareils de voie franchis en pointe à $V < 30$ km/h en voie déviée.

Ces appareils sont précédés :

- d'un signal de ralentissement à distance constitué de 2 feux jaunes sur une ligne horizontale ou verticale, et éventuellement, le jour, d'une cocarde jaune triangulaire pointe en haut (fig. 4)

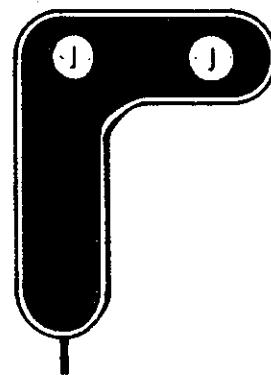
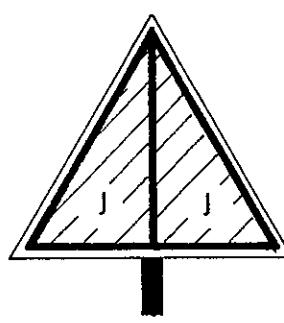


Fig. 4

- d'un signal de rappel de ralentissement constitué de 2 feux jaunes sur une ligne verticale, et éventuellement le jour, d'une cocarde jaune triangulaire pointe en bas (fig. 5)

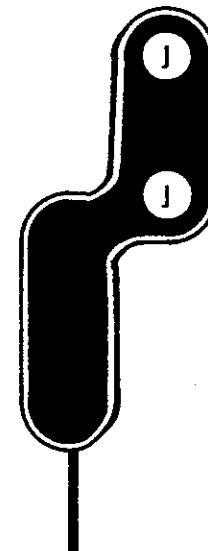
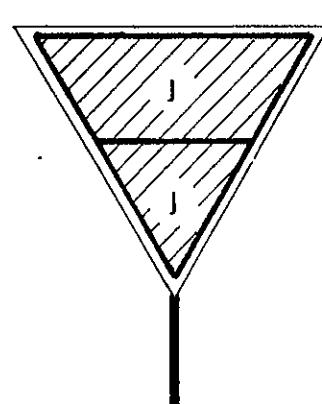


Fig. 5

1.1.2.2. - Appareils pris en pointe à V > 30 km/h.

Ces appareils sont précédés de 2 tableaux indicateurs de vitesse (T.I.V.) mobiles éclairés la nuit :

- l'un en forme de losange à chiffres noirs sur fond blanc, et complété par 2 feux clignotants blancs et d'un "crocodile" (contact fixe placé entre les rails qui transmet à la locomotive, par l'intermédiaire d'un frotteur formé d'une brosse métallique, des indications sur la position du signal franchi) ;
- le 2ème, de rappel de forme carrée à chiffres blancs sur fond noir ;
- d'une plaque "chevron" indiquant la position de la pointe de l'appareil (fig. 6)

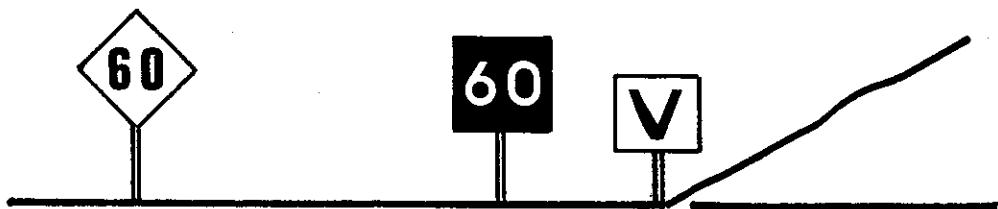


Fig. 6

1.1.2.3. - Limitations permanentes de vitesse.

Elles se rencontrent dans les parties de voies en courbe ou au voisinage d'appareils de voies franchis en pointe ou en talon.

Elles sont précédées d'un T.I.V., et leurs limites sont en général indiquées par des panneaux portant les lettres Z et R (fig. 7)

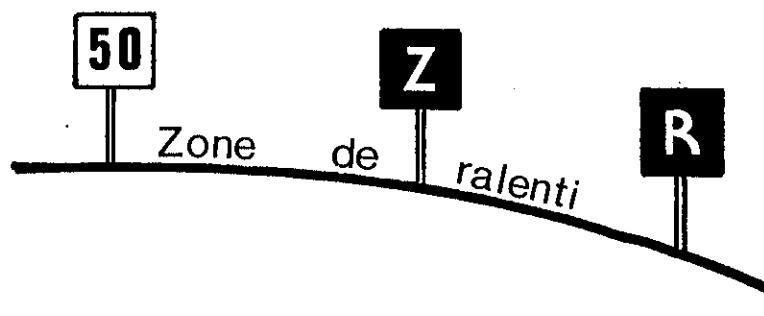


Fig. 7

.../

1.1.2.4. - Limitations temporaires de vitesse.

La présence de chantiers, ou d'obstacles temporaires imposant une limitation de vitesse, est indiquée par des T.I.V. (fig. 8).

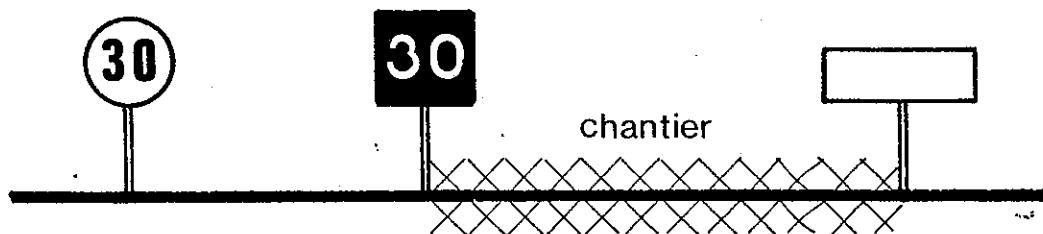


Fig. 8

1.1.3. - Signaux assurant l'espacement des trains

Ces signaux, appelés "sémaphores", sont formés d'un feu rouge complété par un oeilletton blanc et une plaque portant la lettre F (fig. 9), et éventuellement, le jour, d'une aile peinte en rouge étendue à gauche du mât de signal, et rabattable en cas de voie libre.

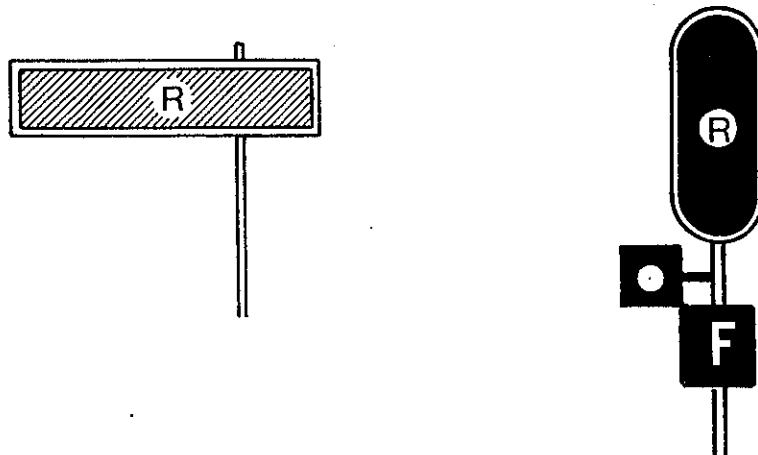


Fig. 9

.../

On utilise cependant de plus en plus le "Block Automatique Lumineux" (B.A.L) dans cette fonction, dont le fonctionnement est commandé automatiquement par les informations provenant de circuits de voie.

Le B.A.L. est constitué de 3 feux alignés verticalement et complétés par un oeilleton blanc (fig. 10).



Fig. 10

- . le feu rouge indique que le canton aval est occupé,
- . le feu jaune indique que le canton aval est libre mais que le signal suivant est rouge,
- . le feu vert indique que le canton aval est libre, et que le feu suivant est au vert ou au jaune.

.../

1.1.4. - Signaux divers :

On peut mentionner :

- les indicateurs de direction équipant certains appareils en pointe et formés de feux blancs ou d'ailes horizontales ou inclinées (fig. 11). Le nombre de feux blancs ou d'ailes inclinées indique le n° d'ordre à partir de la gauche de la direction à prendre.

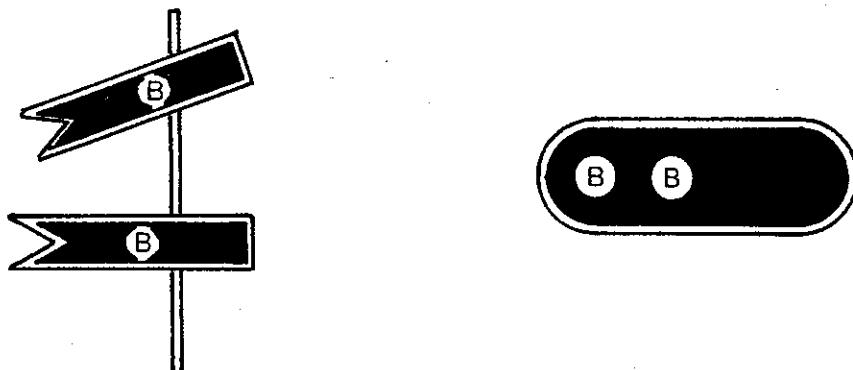
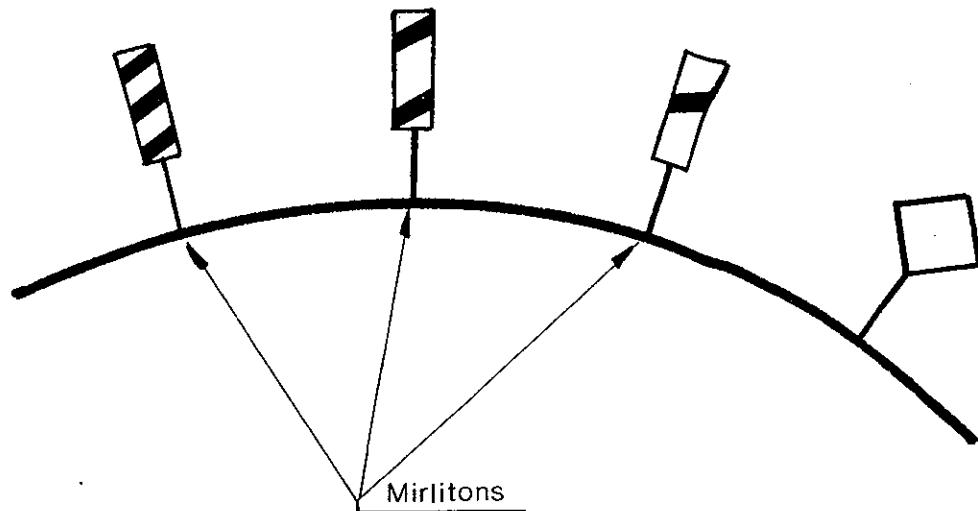


Fig. 11

- les "mirlitons" qui permettent d'annoncer à distance un signal dissimulé par une courbe. Ces mirlitons sont placés respectivement à 150, 300 et 450m du signal à annoncer (fig. 12).

Fig. 12



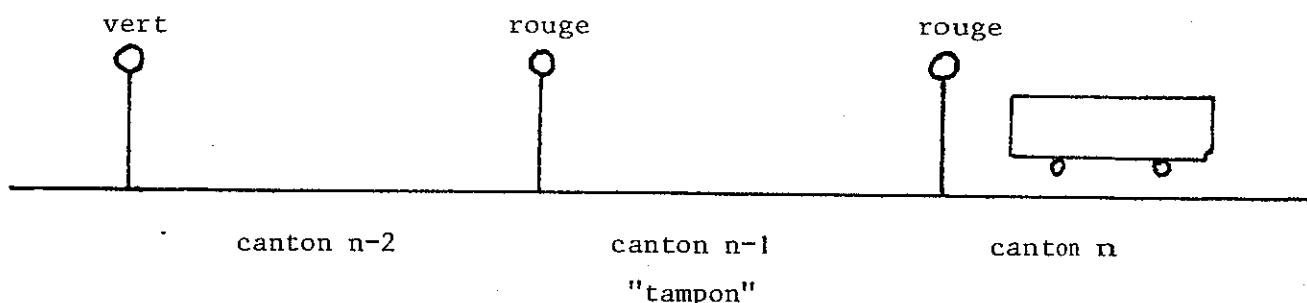
.../

Nota :

Cette signalisation fournie par le B A L est une signalisation dite à "3 aspects" (Rouge, Vert, Jaune).

Il existe de nombreuses variantes de signalisation, mettant en jeu différentes configurations de feux. Nous citerons par exemple :

- la signalisation "2 aspects" (rouge, vert) de la RATP, avec section ou canton "tampon"



Le conducteur doit arrêter son train avant le 1er feu rouge, et ne pas pénétrer dans le canton tampon.

- la signalisation "4 aspects" utilisée sur les voies empruntées par des trains à grande vitesse ($> 200 \text{ km/h}$) :

- . à la S.N.C.F., le 4^e aspect est constitué d'un vert clignotant qui indique aux conducteurs de trains rapides que le feu suivant est au jaune, et qu'ils doivent ralentir à 160 km/h,
- . sur d'autres réseaux, on trouve des codes plus complexes, avec 2 feux allumés simultanément : par exemple, en amont d'un canton occupé on peut trouver :

- un premier signal : rouge-rouge
- un 2^{ème} signal : rouge-jaune
- un 3^{ème} signal : jeune-vert
- un 4^{ème} signal : vert-vert.

1.2. - Signalisation interne aux véhicules ou "cab-signal"

La signalisation fixe a l'inconvénient d'être discontinue et d'imposer une certaine distance de visibilité avant chaque signal.

Depuis quelques années, on voit se développer – surtout pour les trains rapides – une signalisation en cabine qui :

- . d'une part, assure une meilleure perception de la signalisation sur la ligne à grande vitesse ;
- . d'autre part, du fait qu'elle est continue, permet d'améliorer le débit des lignes (fig. 13).

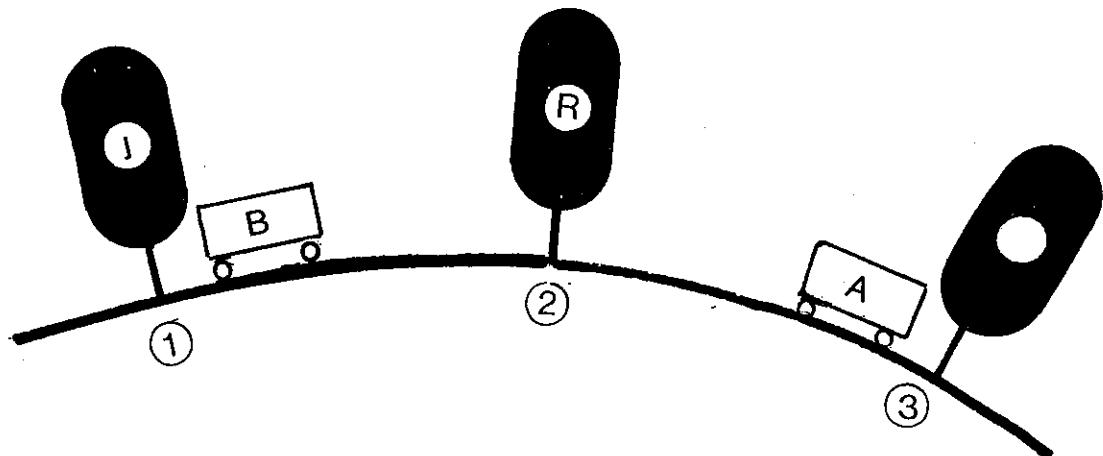


Fig. 13

Fig. 13 : Le train B qui vient de franchir le signal (1) au jaune doit normalement ralentir pour s'arrêter avant le signal (2). Avec le cab-signal il peut être averti très vite que le train A a franchi le signal 3, même s'il ne voit pas le signal 2.

.../

1.3. - Evolution de la signalisation :

Comme on l'a indiqué plus haut, le rôle assigné à la signalisation ne se limite pas à la sécurité, mais on se préoccupe de plus en plus d'utiliser la signalisation pour améliorer la fluidité du trafic.

On peut citer 2 exemples de cette évolution :

1.3.1. - Systèmes de "fluidification" du trafic à la S.N.C.F.

Afin de donner aux régulateurs un moyen supplémentaire d'action sur les trains, des signaux supplémentaires constitués de flèches, pointe en haut ou en bas, ont été expérimentés par la S.N.C.F. et sont en service par exemple dans le système de régulation de la banlieue Paris-Sud Ouest, entre Etampes et Juvisy.

Dans une zone limitée par 2 panneaux portant les mentions :
REG et FIN REG :

- une flèche fixe pointe en bas commande au mécanicien d'observer une vitesse de 60 km/h ;
- une flèche clignotante pointe en bas commande une vitesse de 90 km/h ;
- une flèche fixe pointe en haut commande une vitesse de 120 km/h ;
- une flèche clignotante pointe en haut commande au mécanicien d'observer la vitesse limite indiquée au livret de marche du train.

La présentation de ces différentes flèches permet au régulateur de moduler le retard ou l'avance des trains dans cette zone.

.../

1.3.2. - Système à cantons mobiles déformables

Un système d'échanges continus d'informations voie ↔ trains, baptisé A.46, a été développé récemment en Allemagne. Ce système met en oeuvre un câble posé sur la voie avec des croisements tous les 100m. Ce câble est en général géré par section de 12,800 km par des PC locaux (fig. 14).

Ce câble sert :

- de support pour l'échange de messages codés par voie inductive entre le train et la voie ;
- de dispositif de repérage pour les trains à bord desquels sont détectés et comptés les croisements de la ligne.

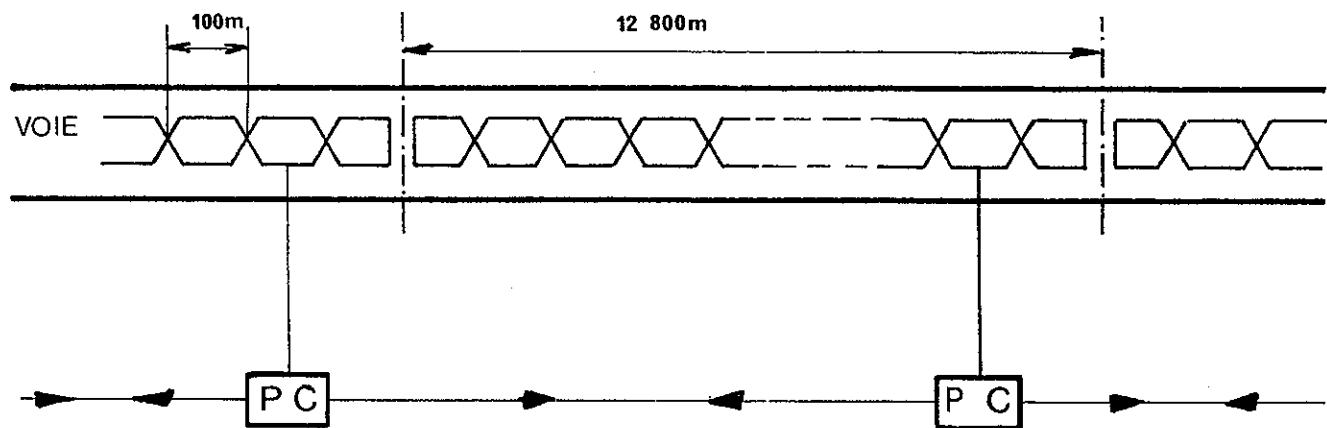


Fig. 14 - Système A.46

Le train envoie à intervalles réguliers vers la voie des informations sur sa position et sa vitesse ; il reçoit en retour les mêmes informations relatives au train qui le précède, et peut ainsi calculer la distance de sécurité à respecter vis-à-vis de ce train.

L'intérêt du canton déformable est d'augmenter la capacité de la voie ; dans les systèmes à cantons fixes en effet, l'espacement entre trains, qui est défini par la longueur des cantons, est fixé par les performances du véhicule ayant les contraintes de freinage les plus sévères, susceptible d'emprunter la voie. Sur une voie avec système à cantons mobiles déformables l'espacement des trains est défini par les capacités réelles de freinage des trains qui circulent à un instant donné sur la voie. On trouvera en annexe un court développement sur cette notion de capacité d'une infrastructure.

... /

1.4. - Information des voyageurs :

Il n'est pas sans intérêt, pour clore ce chapitre sur la signalisation ferroviaire, d'évoquer les progrès faits dans la communication avec les voyageurs.

Nous mentionnerons :

1.4.1. - L'affichage dans les gares

- panneaux de télé-affichage des horaires de trains
- consoles de visualisation d'extrémités des quais.

1.4.2. - Utilisation de la télématicque (au stade expérimental)

- Télématicque grand public :

La S.N.C.F. a participé à l'expérience de Vélizy et, à titre de centre serveur, a mis au point un système

- de diffusion d'informations générales
- de diffusion des horaires des grandes lignes
- de réservation de places
- de télépaiement des réservations (par monnaie électronique)
- de messagerie électronique.

- Télématicque professionnelle :

- la S.N.C.F. participe à l'expérience CITITEL de télématicque pour les grands hôtels et les agences de voyages ;
- elle a en outre étudié un système de télématicque interne pour ses agents.

- Télématicque collective :

La S.N.C.F. participe à des expériences telles que TELEM à NANTES de télématicque dans des lieux publics.

2 - L'INFORMATION ROUTIERE

Pendant très longtemps, la communication entre les exploitants et les usagers de la route s'est limitée à l'usage :

- . de feux de signalisation de carrefours,
- . de la signalisation fixe.

L'objectif principal de cette communication à caractère règlementaire était la sécurité.

Depuis les années 1960, l'apparition des phénomènes de congestion sur le réseau routier et autoroutier a conduit à mettre l'accent sur un 2ème objectif de l'exploitation de la route : la fluidité du trafic. Pour prendre en compte cet objectif, les moyens de communications classiques se sont révélés trop limités, et il a fallu concevoir de nouveaux moyens qui sont :

- . la signalisation variable,
- . la radiodiffusion d'informations routières.

Parallèlement, il fallait également mettre au point toute une chaîne de recueil et de traitement de l'information et l'on a assisté :

- à la création des Centres d'Informations Routières - le CNIR de Roissy (créé en 1966), et les CRIR ;
- au développement de P.C. localisés d'exploitation de zones sensibles : corridors autoroutiers, zones de délestage.

Dans l'exposé qui suit, nous nous proposons de présenter :

- l'organisation générale d'un système d'information routière, en prenant comme exemple le système français,
- les moyens de communication mis en oeuvre actuellement,
- les recherches menées ces dernières années sur les aspects ergonomiques de l'information routière,
- les perspectives d'évolution, telles qu'elles se dégagent notamment des travaux européens sur le sujet.

2.1. - Organisation de l'information routière en France

L'information routière repose sur une circulation de données mettant en jeu les opérations suivantes (Fig. 2) :

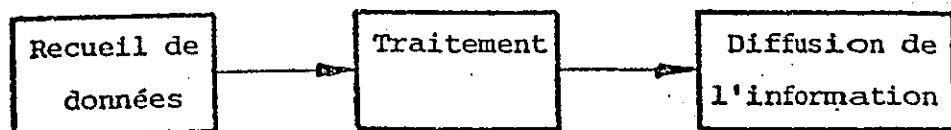


Figure 14 bis

Elle met en oeuvre des échelons

- locaux
- régionaux
- national

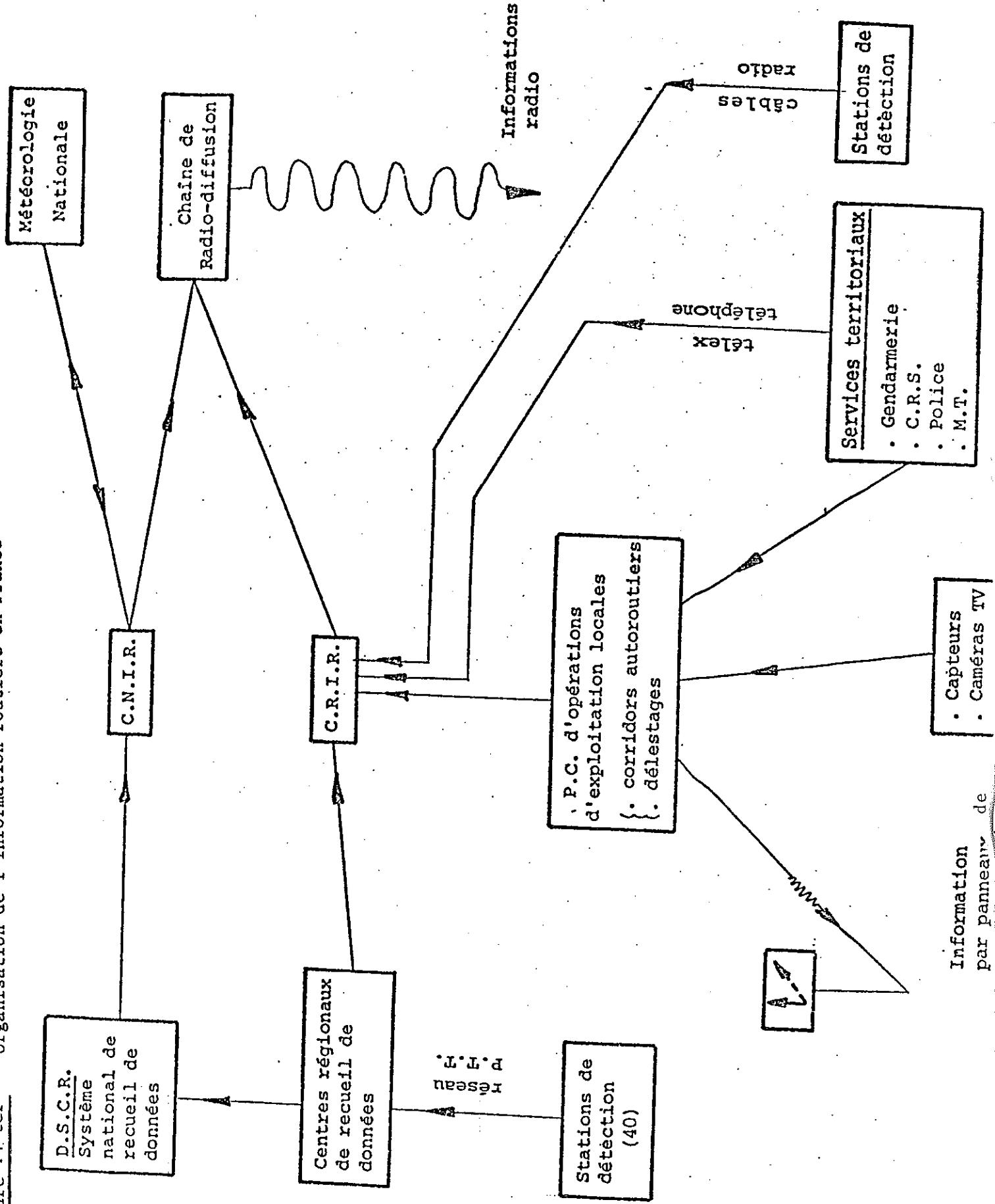
Son organisation générale peut être représentée par le schéma synoptique de la figure 3.

Au plan national on trouve :

- Le CNIR - Centre National d'Information Routière de Roissy-sous-Bois qui traite l'ensemble des données recueillies sur le réseau français et diffuse de l'information à caractère stratégique par l'intermédiaire des chaînes nationales ou périphériques (France Inter, Europe n° 1, Radio Luxembourg, R.M.C.)
- Le système national de recueil de données créé par la Direction des Routes en 1980 qui utilise une quarantaine de stations de détection réparties sur le réseau français, qui lui sont reliées par le réseau P.T.T., et qu'il peut interroger à cadence régulière (30 minutes en période de grandes pointes, 24 heures en temps normal).

.../

Figure 14.ter - Organisation de l'information routière en France



Au niveau régional, on trouve 7 Centres Régionaux d'Informations Routières (C.R.I.R.), situés à LILLE, METZ, RENNES, CRETEIL, LYON, BORDEAUX, MARSEILLE.

Ces C.R.I.R. reçoivent des données d'une part des services territoriaux et d'autre part de stations de détection réparties sur le terrain ; ils retransmettent ces données au C.N.I.R. et diffusent de l'information aux usagers par l'intermédiaire des stations radio locales ou régionales (FIP).

Au niveau local, on trouve les P.C. d'opérations d'exploitation (P.C. autoroutiers, P.C. d'opérations spécifiques) qui transmettent les informations recueillies, d'une part à l'échelon des C.R.I.R., et d'autre part vers les usagers par l'intermédiaire de la signalisation variable.

.../

2.2. - Les moyens de communications avec les usagers

Les deux principaux moyens utilisés actuellement pour transmettre des informations vers les véhicules sont :

- les panneaux de signalisation variable,
- la radiodiffusion.

Nous allons présenter brièvement ces 2 modes de communication.

Nous évoquerons par ailleurs la communication avec les usagers à domicile qui a tendance à se développer actuellement avec l'apparition de moyens nouveaux tels que ANTIOPE ou TELETEL.

2.2.1. - Les panneaux de signalisation variable :

Ils ont été développés en France d'abord pour les opérations de "délestage" qui ont fait leur apparition vers 1970 sur le réseau routier et autoroutier français : ces opérations consistent, lorsqu'un itinéraire principal est saturé, globalement ou en certains "points chauds", à essayer de détourner le trafic sur des itinéraires secondaires moins chargés, grâce à une modification des indications de direction à l'embranchement entre l'itinéraire principal et l'itinéraire secondaire (fig. 15).

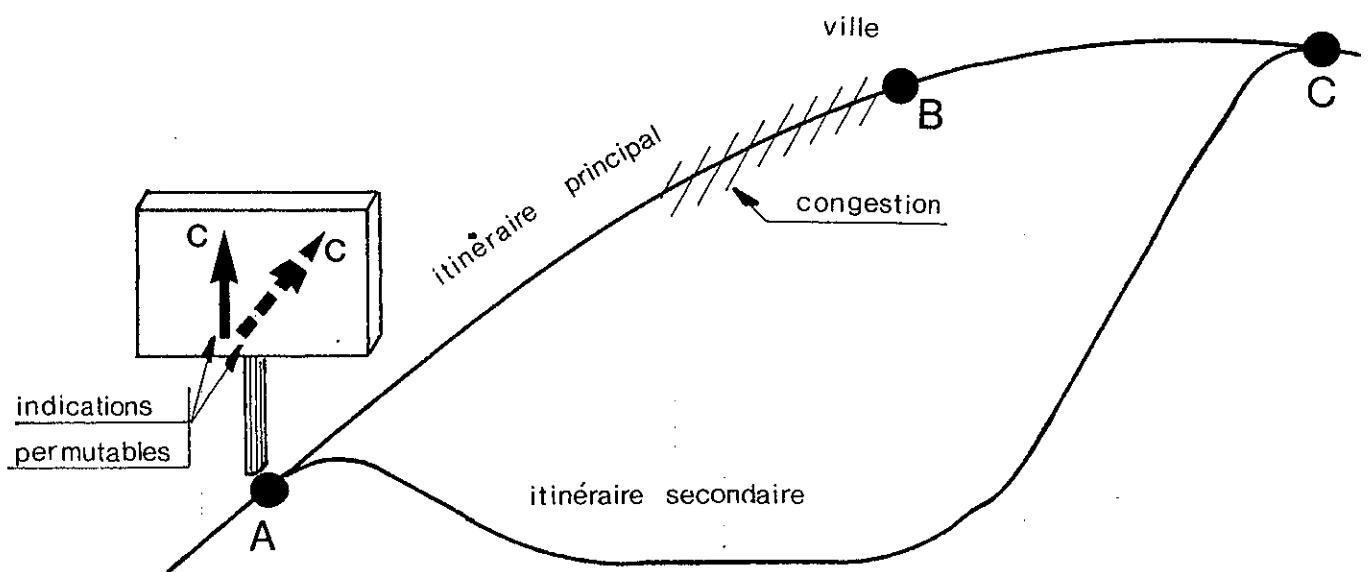


Fig. 15

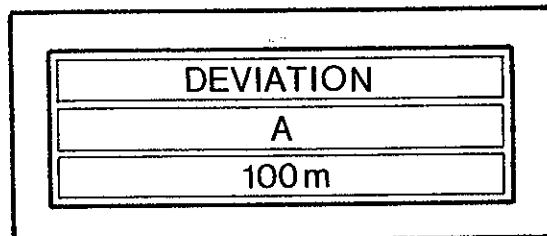
Depuis, ces panneaux sont couramment utilisés :

- sur routes et autoroutes pour donner des informations aux conducteurs, du type : "bouchon", "verglas", "travaux", etc.....
- sur autoroutes pour afficher des indications de vitesses recommandées.

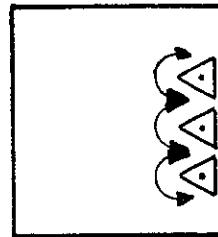
Différentes technologies sont disponibles pour réaliser ces panneaux.

Nous en citerons quelques unes :

- Panneaux à Neutral (Plexiglas teinté) présentant un seul message qui n'est visible que lorsque le caisson du panneau est éclairé.
- Panneaux à prismes rotatifs (fig. 16)



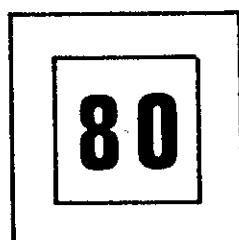
Vue de face



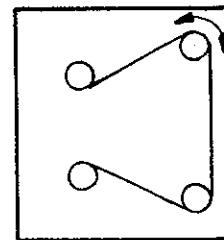
Coupe de côté

Fig. 16 - panneaux à prismes

- Panneaux à rideaux enroutables (fig. 17)



Vue de face

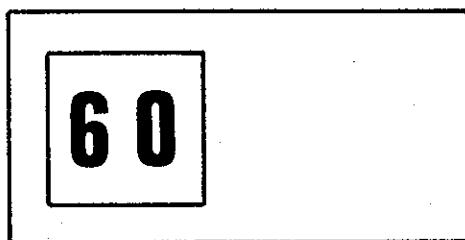


Coupe de côté

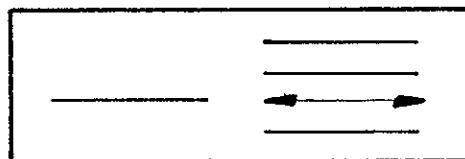
Fig. 17 - panneaux à rideaux

.../

- Panneaux à volets coulissants (fig. 18)



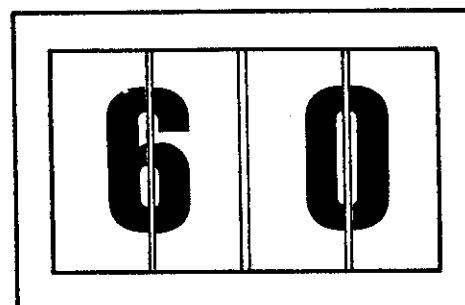
Vue de face



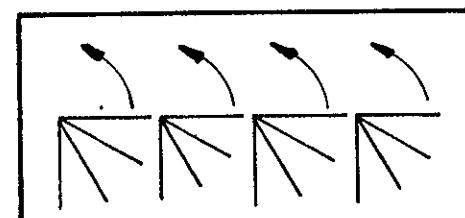
Coupe longitudinale

Fig. 18

- Panneaux à lamelles tournantes (fig. 19)



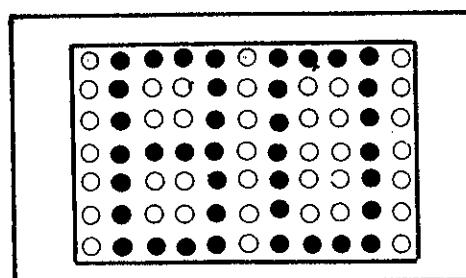
Vue de face



Coupe longitudinale

Fig. 19 - panneaux à lamelles tournantes

- Panneaux à matrices de lampes (fig. 20)

Fig. 20 - panneaux à matrices de lampes

- Panneaux à fibres optiques (fig. 21)

La présentation extérieure de ces panneaux est proche de celle des panneaux à matrices de lampes, en ce sens qu'elle est formée de modules de points lumineux groupés en éléments rectangulaires.

Cependant, dans les panneaux à matrices de lampes, à chaque point lumineux correspond une lampe, tandis que dans les panneaux à fibres optiques, les points lumineux sont des lentilles : à chaque message à afficher correspond une seule lampe qui éclaire un faisceau de fibres qui sont raccordées aux lentilles appropriées de la face avant (fig. 21)

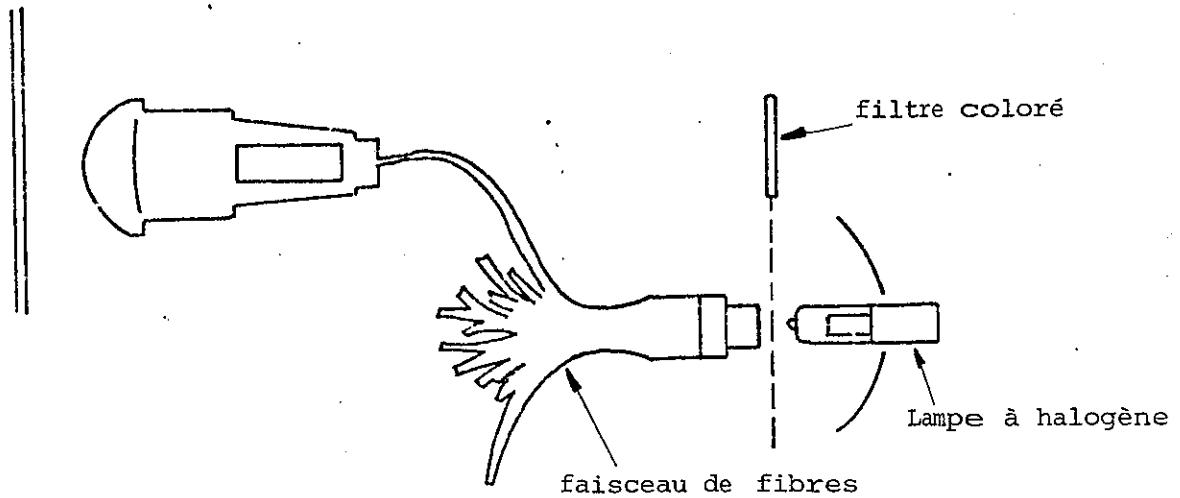


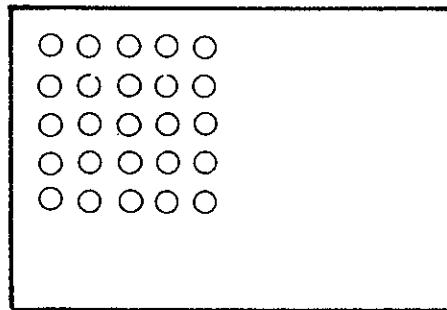
Fig. 21 - Panneaux à fibres optiques

... /

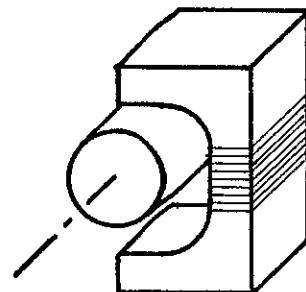
- Panneaux à disques ou cylindres tournants (fig. 22)

Ces panneaux se présentent extérieurement comme des matrices de points, mais contrairement aux matrices de lampes ou à fibres optiques, ces points ne sont pas lumineux, et la face avant de ces panneaux doit comporter un éclairage extérieur la nuit.

Le principe du fonctionnement est le suivant : chaque point de la matrice est matérialisé soit par un petit disque aimanté, soit par un petit cylindre aimanté commandé par un électro-aimant, et présentant soit une face neutre, soit une face réfléchissante de couleur claire suivant le sens du courant de commande.



Face avant



Commande d'un cylindre

Fig. 22 - Panneaux à cylindre ou disque

.../

2.2.2. - La radiodiffusion d'informations

C'est un moyen qui est maintenant utilisé couramment, la tendance en matière d'information routière étant, comme dans le trafic ferroviaire, d'informer le conducteur dans son véhicule, soit sous forme orale, soit sous forme visuelle.

Pour l'instant, cette communication met surtout en oeuvre les chaînes de radiodiffusion publiques ou commerciales dont l'utilisation présente un certain nombre d'inconvénients :

- étendue de la couverture trop importante - notamment dans le cas de chaînes en basse ou moyenne fréquence modulation d'amplitude du type France-Inter G.O. - Les conducteurs reçoivent de nombreux messages n'intéressant pas la partie du trajet qui les concerne ;
- difficulté d'insérer des messages au milieu de programmes musicaux, culturels ou de variétés.

C'est pourquoi de nombreuses recherches sont en cours afin de trouver des moyens de transmission mieux adaptés.

La plus grosse difficulté dans ce domaine, comme on le verra, est de trouver des fréquences disponibles pour assurer ces liaisons entre l'infrastructure et les véhicules.

2.2.2.1. - Les réalisations et recherches à l'étranger :

Deux systèmes spécifiques sont actuellement en service à l'étranger

- le système allemand "ARI" en Allemagne Fédérale, en Suisse et en Autriche ; il s'agit d'un système d'identification de programme mettant en jeu des fréquences pilotes incorporées dans la bande d'émission, qui facilite au conducteur la recherche du canal VHF sur lequel sont émises des informations routières, et permet éventuellement de faire passer l'autoradio d'un mode "veille" à un mode "écoute". Ce système implique que les postes autoradio soient équipés d'un décodeur spécial ;

- le système "HAR" (Highway advisory radio) aux Etats-Unis.

Ce système, qui équipe actuellement une quarantaine de tronçons d'autoroutes, et qui ne nécessite aucune modification du poste autoradio, repose sur des émetteurs situés en bord de route.

Ces émetteurs sont reliés à des antennes constituées d'un câble de 1 ou 2 km de long et fonctionnent sur des fréquences de 530 ou 1.610 kHz correspondant aux limites du spectre des émissions ondes moyennes reçues par les postes autoradio.

Sur le plan de la recherche, il est intéressant de mentionner un système étudié depuis plusieurs années par la BBC en Grande-Bretagne le système "CARFAX", qui consiste à couvrir le territoire du pays par un réseau d'émetteurs de faible portée (20 à 30 km), fonctionnant tous sur la même fréquence.

On évite les interférences entre ces émetteurs en organisant les émissions de telle sorte que 2 émetteurs voisins n'émettent jamais en même temps. Les avantages de ce système sont :

- l'économie de fréquences,
- le faible coût des récepteurs.

Ce projet n'a cependant toujours pas vu le jour faute, pour la BBC de trouver un canal disponible.

2.2.2.2. - Les recherches françaises :

En France on se heurte, comme partout ailleurs, à la difficulté de trouver des fréquences utilisables pour l'information routière.

Un certain nombre de recherches ont été menées depuis le début des années 1970 sur ce thème, mais n'ont pas abouti jusqu'à présent à la conception d'un système opérationnel. Parmi les systèmes envisagés, on peut citer :

- les dispositifs d'informations dites "localisées" consistant à utiliser des émetteurs de faible portée (2 à 3 km) situés au bord de la chaussée : plusieurs projets ont été étudiés dans la période 1970-75 (PAAC, SILAUE, BIP-CAR). Cependant, ces projets ont été abandonnés à la suite notamment des études menées dans le cadre du Comité Européen COST 30 (cf. annexe), qui ont montré que, compte tenu de la faible densité des incidents sur un réseau, et surtout des délais nécessaires pour détecter ces incidents, de tels systèmes ne se justifiaient pas, du moins à court ou moyen terme,
- le système EMERAUDE (envoi de messages aux automobilistes et personnes en déplacement).

Ce système a été étudié par la Direction des Télécommunications, en liaison avec la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière (D.S.C.R.) en 1982-83.

Il pourrait s'appuyer sur l'infrastructure du futur réseau de radiotéléphonie mobile qui doit être installé sur le réseau routier français au cours des prochaines années ; ce réseau a la caractéristique d'être cellulaire, c'est-à-dire de mettre en œuvre des émetteurs/récepteurs de faible portée, couvrant des zones de 10 à 30 km de rayon.

Ce réseau doit être complété par un système de transmission d'informations numériques destinés à remplacer à terme le système EUROSIGNAL, et qui permettra d'envoyer à partir de n'importe quel poste téléphonique vers une personne en déplacement un message numérique qui sera décodé dans le récepteur et dont le contenu pourra s'afficher sur une barrette lumineuse.

Le principe d'EMERAUDE consisterait à utiliser ce système de transmission numérique pour envoyer à tous les automobilistes d'une zone déterminée un message d'information routière qui serait décodé et traduit par un synthétiseur de parole,

- plus récemment, la Régie RENAULT a étudié en liaison avec TDF un système baptisé ATLAS, fondé sur l'envoi, sur un canal TV, des cartes routières portant des informations sur le trafic et l'état des routes, et qui pourraient s'afficher sur un écran situé sur le tableau de bord.

2.2.3. - Système d'information à domicile :

Dans un exposé sur l'information routière, il convient de ne pas passer sous silence ces systèmes, qui bien que ne fournissant pas d'information en temps réel dans son véhicule au conducteur, peuvent permettre cependant à celui-ci de mieux préparer son déplacement.

En France, outre les chaînes classiques de radiodiffusion, deux systèmes nouveaux commencent à être opérationnels :

- ANTIOPE : rappelons que ce système utilise des trames disponibles dans le canal de diffusion de TF1 pour transmettre à des clients disposant d'un écran de TV et d'une interface appropriée des informations fournies par divers "serveurs" : cours de Bourse, météo, résultats sportifs, etc.... La D.S.C.R. dispose de 40 pages et expérimente actuellement un service de diffusion d'informations routières par ce canal.

Ces informations portent sur :

- l'état des routes,
- l'état du trafic,
- Les prévisions de grandes pointes,
- les conseils de sécurité.

Elles sont accessibles durant les heures de diffusion de TF1.

.../

- TELETEL : La D.S.C.R. participe actuellement à l'expérience TELETEL de Vélizy, et a mis en place un Centre Serveur, baptisé TRENTEL. Ce Centre dispose d'un programme d'environ 1.200 pages qui a été mis au point avec le concours du Service Informatique du CETE d'Aix. Ce programme comporte 3 rubriques :

- Circulation routière : cette rubrique reprend les données d'ANTION et met en outre l'accent sur la Région Parisienne. Elle a la particularité d'être mise à jour tous les quarts d'heure.
- Règlementation routière : informations sur les formalités d'obtention du permis de conduire, de la carte grise, etc....
- Annuaires d'autoroutes : renseignements pratiques sur la tarification les aires de service, etc....

La D.S.C.R. va, en outre, être associée aux prochaines expériences d'annuaire électronique et prépare la mise en place de serveurs régionaux à Rennes et en Picardie.

.../

2.3. - Les aspects ergonomiques de l'information routière et la définition des besoins dans ce domaine

Dès l'apparition des premiers systèmes d'exploitation de la route, au début des années 1970, les autorités responsables ont commencé à se préoccuper de l'attitude des usagers vis-à-vis de ces systèmes et des besoins dans ce domaine.

Les recherches en la matière ont été coordonnées sur le plan européen par une instance créée par la C.E.E. dans le cadre de ses activités de Coopération Scientifique et Technique (COST), le Comité de l'Action COST 30 "Aides électroniques à la circulation".

Cette action, lancée en 1970, s'est concentrée tout particulièrement sur l'information routière, du fait que c'est dans ce domaine que, d'une part les connaissances apparaissaient comme les plus floues, et que d'autre part une normalisation à l'échelle européenne s'avérait particulièrement utile.

Les principales questions que soulevait ce concept d'information routière peuvent être résumées ainsi :

- Rôle de l'information routière - Besoins des usagers et des exploitants
- Supports et techniques de présentation les plus appropriés :
 - . interne ou externe au véhicule ?
 - . présentation visuelle ou orale ?
- Couverture de l'information : diffusion locale ou zonale ?
- Contenu de l'information à diffuser
- Forme de l'information :
 - . indications factuelles ?
 - . conseils et recommandations ?
- Mode d'expression :
 - . caractères, symboles pour l'information visuelle
 - . langues
- Structure des messages
- Fréquence des messages.

Des recherches ont été menées dans tous les pays européens participant à l'action COST 30 sur tous ces sujets, en s'appuyant en outre sur une bibliographie portant sur les travaux effectués aux Etats-Unis.

Ces recherches ont comporté :

- des enquêtes sur les besoins en matière d'information routière :
 - . besoins des usagers
 - . besoins des exploitants

- des études sur l'ergonomie de l'information routière, et en particulier sur :
 - . les conditions de visibilité et de lisibilité des panneaux variables
 - . le choix des caractères et symboles à afficher,
 - . la compréhension et la rétention par les usagers des messages routiers et la comparaison à cet égard des moyens de communication visuels et oraux.

Il est difficile, au cours d'un aussi bref exposé, de rendre compte de façon détaillée du déroulement de toutes ces recherches.

Nous allons simplement en rappeler ici les résultats les plus significatifs :

2.3.1.- En premier lieu, il apparaît que la grande majorité des conducteurs apprécie l'information routière, même si elle ne la juge pas toujours très fiable.

Les sujets de préoccupation les plus importants des usagers et sur lesquels ils souhaitent le plus être informés sont dans l'ordre d'importance décroissante :

- . l'état des routes et les conditions météorologiques,
- . l'état général du trafic, qui sert de base aux estimations sur la durée du trajet,
- . les embouteillages et les bouchons.

2.3.2.- Le nombre d'informations à transmettre est cependant relativement limité :

Sur l'ensemble des réseaux routiers et autoroutiers de rase campagne, il se produit de l'ordre de 30 à 60 évènements par km et par an, mais la fréquence des évènements affectant de façon significative le trafic est très faible - de l'ordre de 1 à 2 évènements par km et par an -

Toutefois, cette fréquence peut atteindre des valeurs beaucoup plus importantes (variant de quelques dizaines à quelques centaines d'évènements/km/an) sur une partie très limitée du réseau constituée par les routes et autoroutes de dégagement des très grandes villes.

2.3.3.- Il apparaît surtout qu'en matière d'information routière la principale difficulté consiste à détecter les incidents ou accidents.

Sur la plupart des réseaux routiers et autoroutiers, il existe actuellement relativement peu d'installations de détection automatique du trafic, et la principale source de données est constituée par les messages transmis par les automobilistes eux-mêmes, par les bornes d'appel d'urgence ou par le réseau téléphonique.

Il en résulte qu'on ne peut espérer dans l'état actuel d'équipement des routes, et sauf sur des zones très limitées, détecter un évènement intéressant le trafic dans des délais inférieurs à environ 15 à 20 minutes.

... /

2.3.4.- Dans ces conditions, le développement de moyens de communication sophistiqués mettant en jeu des équipements coûteux sur l'infrastructure et à bord des véhicules n'apparaît pas essentiel, et l'on peut penser qu'à moyen terme l'information routière continuera à s'appuyer sur les 2 moyens principaux utilisés actuellement pour assurer les communications avec les conducteurs, à savoir :

- les panneaux de signalisation variable dans les zones très fréquentées où la présence d'installations de détection efficaces et la fréquence des incidents justifient l'implantation de ces panneaux ;
- la radiodiffusion de type régional sur l'ensemble du réseau routier de rase campagne.

Il est toutefois recommandé d'améliorer si possible les conditions d'accès à ces systèmes de radiodiffusion régionale, et le Comité COST 30 préconise le développement, à l'échelle européenne, de moyens permettant de faciliter la recherche de programmes routiers, tels que le système ARI allemand.

On trouvera en pièce jointe une communication présentée à un séminaire CEMT-COST en Juin 85, qui fait le bilan général de l'action COST 30 et qui rappelle les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette action.

.../

2.4. - Perspectives d'évolution des systèmes d'information routière

Nous venons de voir qu'à moyen terme peu d'évolutions sont à attendre dans les techniques utilisées pour communiquer avec les conducteurs.

Pour le plus long terme cependant, les recherches actuelles, notamment en matière de guidage électronique et d'aide à la navigation, laissent pressentir les directions dans lesquelles des évolutions pourraient avoir lieu.

2.4.1. - Le guidage électronique

Pour ce terme, on désigne généralement des systèmes permettant de donner au conducteur, à partir d'équipements situés sur l'infrastructure, des indications visuelles sur la direction à suivre à chaque point de choix de son itinéraire.

Le guidage électronique met en jeu un échange d'informations entre le véhicule et la chaussée en amont de chaque carrefour ou embranchement : le véhicule est équipé d'un émetteur/récepteur d'un clavier à l'aide duquel le conducteur introduit au départ le code de sa destination, et d'un petit écran de visualisation.

A chaque point de choix, un dispositif constitué d'un émetteur/récepteur, d'une antenne placée dans la chaussée, et d'une logique, interroge le véhicule sur sa destination et lui renvoie la direction à suivre sous forme d'une flèche affichée sur l'écran de visualisation.

Le principe de ces systèmes, conçu aux Etats-Unis vers 1970 sous le nom de E.R.G.S. (Electronic Road Guidance System), a suscité beaucoup d'intérêt en Allemagne et au Japon ces dernières années, et a fait l'objet d'expérimentations à grande échelle dans ces pays.

Le système allemand "ALI" a été expérimenté sur un réseau autoroutier de la région de Dortmund en 1979-80, et le système japonais "CAC" a été expérimenté sur une zone de Tokyo comprenant une centaine de carrefours, en 1977-78.

Aucune suite n'a cependant été donnée jusqu'à présent à ces expérimentations.

2.4.2. - Systèmes d'aide à la navigation

Les systèmes de guidage électronique du type de CAC ou ALI nécessitent une infrastructure très lourde qui risque de ralentir leur développement. C'est la raison pour laquelle, dans plusieurs pays, des recherches ont été faites sur des systèmes plus autonomes, reportant à bord des véhicules tout ou partie du traitement de l'information nécessaire au guidage et que l'on peut qualifier d'"aide à la navigation".

Nous en décrivons brièvement quelques uns :

2.4.2.1.- Dispositif d'aide à la navigation (DANA)

Ce dispositif a fait récemment l'objet d'études préliminaires par l'I.R.T., le CERT-DERA et TREGIE.

Son principe consiste à fournir aux automobilistes des informations de guidage, mais sans nécessiter l'infrastructure complexe demandée par les systèmes de guidage électronique expérimentés récemment en Allemagne (ALI) et au Japon (CACS).

Il est conçu autour de 3 grandes fonctions :

- une fonction "localisation" dont l'objet est d'entretenir à bord la position du véhicule grâce à des capteurs de distance parcourue et de direction
- une fonction "calcul du plus court chemin" dont l'objet est de fournir à l'automobiliste des indications sur la route la plus courte à suivre pour atteindre son point de destination ;
- une fonction "traitement d'informations numériques sur le trafic", dont l'objet serait de traiter des informations fournies par un système tel qu'EMERAUDE et de tenir compte de ces informations pour les calculs de plus court chemin.

.../

Les recherches se sont, pour l'instant, concentrées sur les dispositifs de localisation : différents capteurs de direction ont été expérimentés au CERT-DERA :

- capteur d'angle au volant,
- mesure différentielle des tours de roues arrière,
- compas magnétique.

A la suite d'essais de laboratoire satisfaisants, une première maquette a été réalisée en utilisant comme capteur un odomètre et un dispositif de mesure de l'angle au volant. Les essais de cette maquette sur divers types de chaussées ont cependant montré que les variations de profil en travers perturbaient les mesures et introduisaient des dérives difficiles à compenser dans la détermination du cap du véhicule.

Il semble que la mesure du cap, qui est l'un des éléments essentiels du système, nécessitera d'associer un capteur relatif, tel que l'angle au volant ou le différentiel des roues arrière, et un capteur absolu tel qu'un magnétomètre.

2.4.2.2.- Réalisations et projets à l'étranger

- Un système de cartes électroniques mettant en jeu un gyromètre fluidique est déjà commercialisé par HONDA.
- En Allemagne, plusieurs systèmes sont à l'étude :
 - EVA (Bosch) : système d'aide à la navigation mettant en jeu un dispositif de localisation autonome ainsi que des balises de recalage sur la chaussée.

AUTOSCOUT (Siemens) : système d'aide à la navigation susceptible de fonctionner, soit de façon autonome, soit associé à des balises situées sur la chaussée.

... /

- En Grande Bretagne, le T.R.R.L. a étudié des dispositifs du même genre :

ROESY (Road enquiry system), dispositif autonome comprenant une carte électronique gérée par microprocesseur et un odomètre.

NAVIGATOR, dispositif comprenant une carte électronique à bord, et des balises de recalage aux points de choix sur la chaussée.

Par ailleurs, un dispositif de localisation autonome LANDFAI a été mis au point par G.E.C. Traffic Automation.

2.4.3. - Les conclusions de l'Action 30 vis-à-vis de ces évolutions

Les positions dégagées par l'Action 30 vis-à-vis de ces évolutions peuvent se résumer ainsi :

- les enjeux de l'information routière ne sont pas suffisants pour motiver des investissements importants de la part des Administrations responsables, et il est vraisemblable que même à long terme cette information continuera à reposer sur des émetteurs régionaux à couverture assez large.

- cependant, la tendance est actuellement à développer les applications de la microélectronique à bord des véhicules, et à doter ceux-ci d'une certaine "intelligence".

En particulier, des systèmes d'aide à la navigation, permettant aux véhicules de se localiser automatiquement sur un réseau, pourraient être commercialisés couramment d'ici une dizaine d'années.

.../

- Le système de communication de l'avenir pourrait être dans ces conditions un système de radiodiffusion de messages numériques codés sous une forme standardisée. Ces messages pourraient être décodés à bord des véhicules, filtrés grâce à ces dispositifs de localisation, et présentés au conducteur soit sous forme visuelle sur des cartes électroniques, soit sous forme orale à l'aide de synthétiseurs de la parole.

Même sur les véhicules non équipés de dispositifs de localisation automatique, le conducteur pourrait avoir la possibilité d'introduire manuellement sur son récepteur des éléments sur sa position et sur son trajet, permettant un certain filtrage des informations reçues.

- l'intérêt de cette communication numérique - outre les possibilités de filtrage et la variété des présentations qu'elle permet à bord du véhicule, - est qu'elle nécessite un spectre moins large que la parole, et qu'elle pourrait éventuellement être superposée, dans un même canal, à des émissions normales de radiodiffusion.

... /

2.5. Conclusion

L'exposé qui précède montre tout l'intérêt que ces thèmes de l'information routière et des aides à la conduite ont suscité depuis 15 ans, tant en France qu'à l'étranger.

Les principales conclusions que l'on peut tirer des nombreux travaux qui ont été menés sur la question sont :

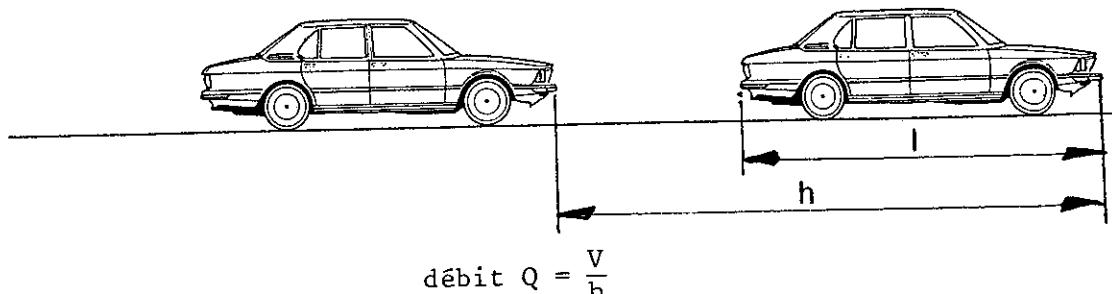
- en matière d'information routière, le point le plus faible actuellement est la capacité de détection des incidents ou autres évènements intéressant le trafic ;
- les moyens de diffusion dont on dispose actuellement - panneaux variables pour les zones très fréquentées, radiodiffusion pour les zones à trafic moins dense -- restent relativement bien adaptés à ces capacités de détection. Toutefois, tout le monde est conscient des limitations imposées par les contraintes des chaînes de radiodiffusion à l'efficacité d'un système d'information routière, et la nécessité d'améliorations dans ce domaine n'est contestée par personne ;
- pour le plus long terme, il ressort des travaux de COST 30 que le système qui pourrait s'imposer consisterait à associer une transmission d'informations routières, sous forme numérique, par radio de type régionale avec un système de navigation autonome à bord des véhicules qui filtrerait ces informations et en assurerait une présentation optimale au conducteur sous forme visuelle ou orale.



ANNEXENOTION DE CAPACITE D'UNE INFRASTRUCTURE

La capacité d'une infrastructure, telle qu'une autoroute ou une voie de chemin de fer, est par définition le débit maximal de véhicules qu'elle peut supporter.

On vérifie facilement que le débit de véhicules sur une voie, en supposant des conditions de circulation régulières, à vitesse constante, avec des véhicules régulièrement espacés, est représenté par le rapport entre la vitesse V et l'intervalle h moyen entre les véhicules :



A vitesse donnée V , ce débit est donc inversement proportionnel à l'espacement h des véhicules. Cependant, cet espacement ne peut pas être fixé arbitrairement, et est limité inférieurement, pour des conditions de sécurité, à la distance de freinage nécessaire aux véhicules pour s'arrêter sans se heurter en cas d'arrêt brutal d'un véhicule sur la voie.

Cette limite inférieure peut varier selon la sévérité des contraintes de sécurité que l'on s'impose.



1. SECURITE DE TYPE FERROVIAIRE : HYPOTHESE DU "MUR DE BRIQUES" :

En général dans les systèmes ferroviaires, on fixe l'intervalle à respecter entre véhicules en prenant l'hypothèse très restrictive qu'un véhicule pourrait s'arrêter brusquement, sur place, comme s'il heurtait un mur : c'est l'hypothèse dite du "mur de briques".

Dans ces conditions, l'espacement minimal entre véhicules doit être égal à la distance nécessaire pour passer de la vitesse V à l'arrêt à partir du moment où un arrêt du véhicule précédent a été détecté.

Cet espacement minimal est donné par la formule :

$$h = \frac{V^2}{2a} + V\tau + \ell$$

où : a = décélération maximale admissible

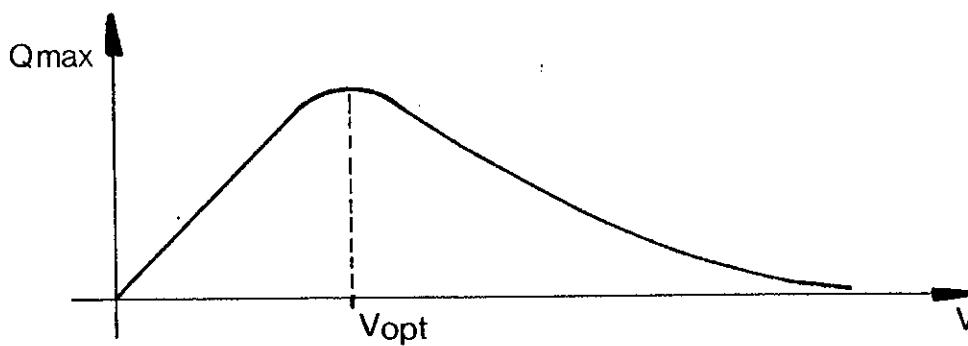
τ = temps de réaction du conducteur

ℓ = longueur des véhicules

Dans ces conditions, le débit maximal sur une voie où les véhicules circulent à la vitesse V est donné par :

$$Q_{\max.} = \frac{V}{h} = \frac{V}{\frac{V^2}{2a} + V\tau + \ell}$$

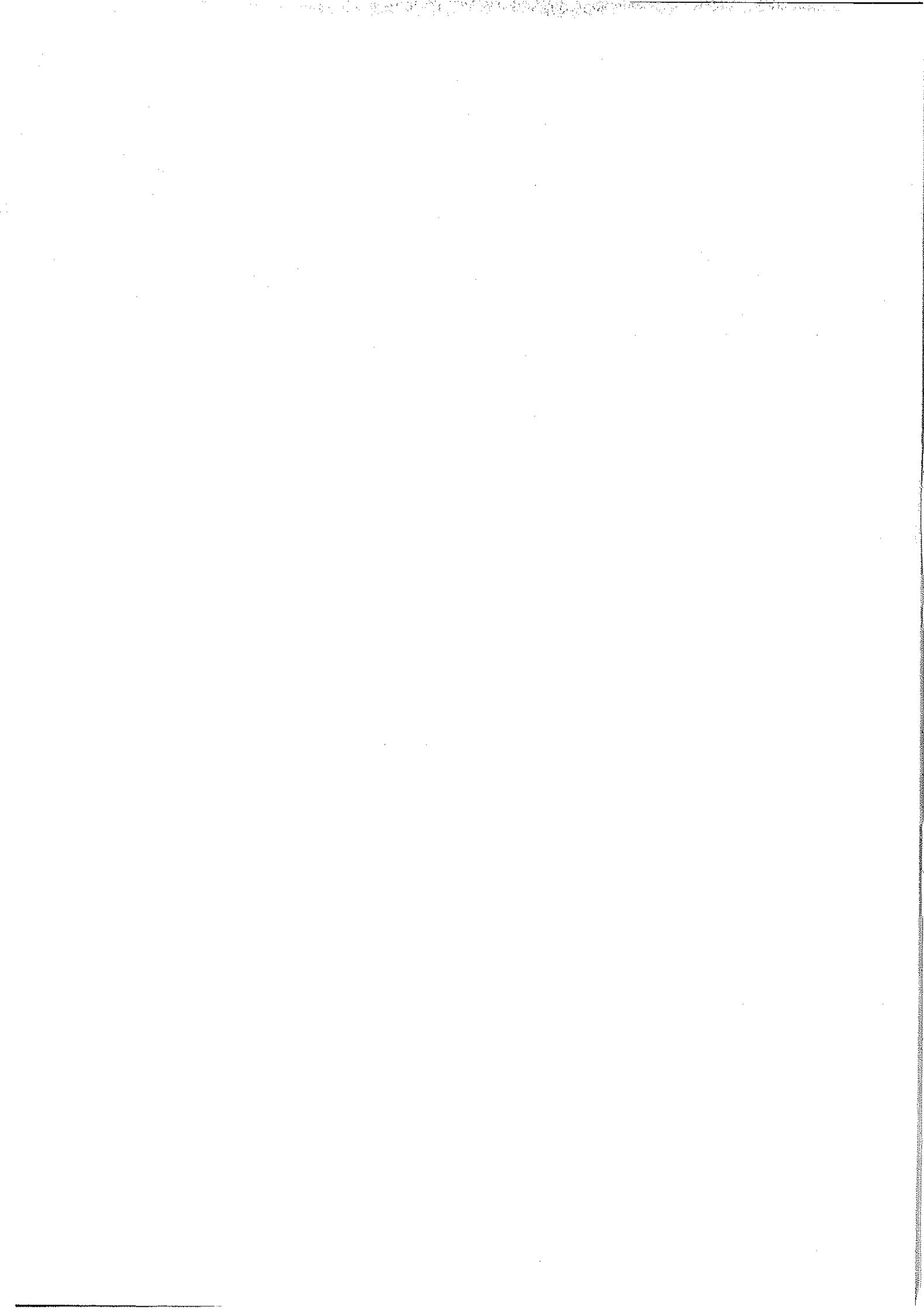
On voit que ce débit maximal varie avec la vitesse conformément à la courbe suivante :



La capacité correspond à la vitesse pour laquelle ce débit passe par un maximum et qui est donnée par :

$$\frac{dQ_{\max.}}{dV} = 0, \text{ soit : } \frac{V^2}{2a} + \ell = 0$$

$$\text{soit : } V = V_{\text{opt}} = \sqrt{2a\ell}$$



En remplaçant V par cette valeur dans la formule donnant $Q_{\max.}$, on trouve

$$\text{Capacité } C = \frac{1}{\sqrt{\frac{2l}{a}} + \tau}$$

L'un des intérêts de l'automatisme est de réduire la constante de temps τ .

Exemple : Prenons

$$\left\{ \begin{array}{l} l = 20m \\ a = 2,5 \text{ m/sec}^2 \\ \tau = 1 \text{ sec.} \end{array} \right.$$

On trouve : $V_{\text{opt}} = \sqrt{100} = 10 \text{ m/sec} = 36 \text{ km/h}$

$$C = \frac{1}{\sqrt{16 + 1}} = \frac{1}{5} \text{ véh/sec} = 720 \text{ véh/h}$$

2. INTERET DE FAIRE CIRCULER LES VEHICULES EN "TRAIN" :

La formule que nous avons trouvée ci-dessus correspond à la capacité d'une voie sur laquelle les véhicules circulent individuellement.

Supposons maintenant que nous groupions les véhicules en trains de n véhicules la capacité va maintenant s'exprimer en nombre de trains/heure, et va se calculer en remplaçant l par $n l$ dans les formules précédentes :

La vitesse optimale devient V_{opt} : $\sqrt{2anl}$ et la capacité : $C = \frac{n}{\sqrt{\frac{2l}{a}n} + \tau}$

Si l'on néglige le temps de réaction τ , on voit que la capacité, exprimée en nombre de véhicules, est multipliée par \sqrt{n} , pour une vitesse optimale également multipliée par \sqrt{n} .

Exemple : Reprenons les termes de l'exemple précédent,

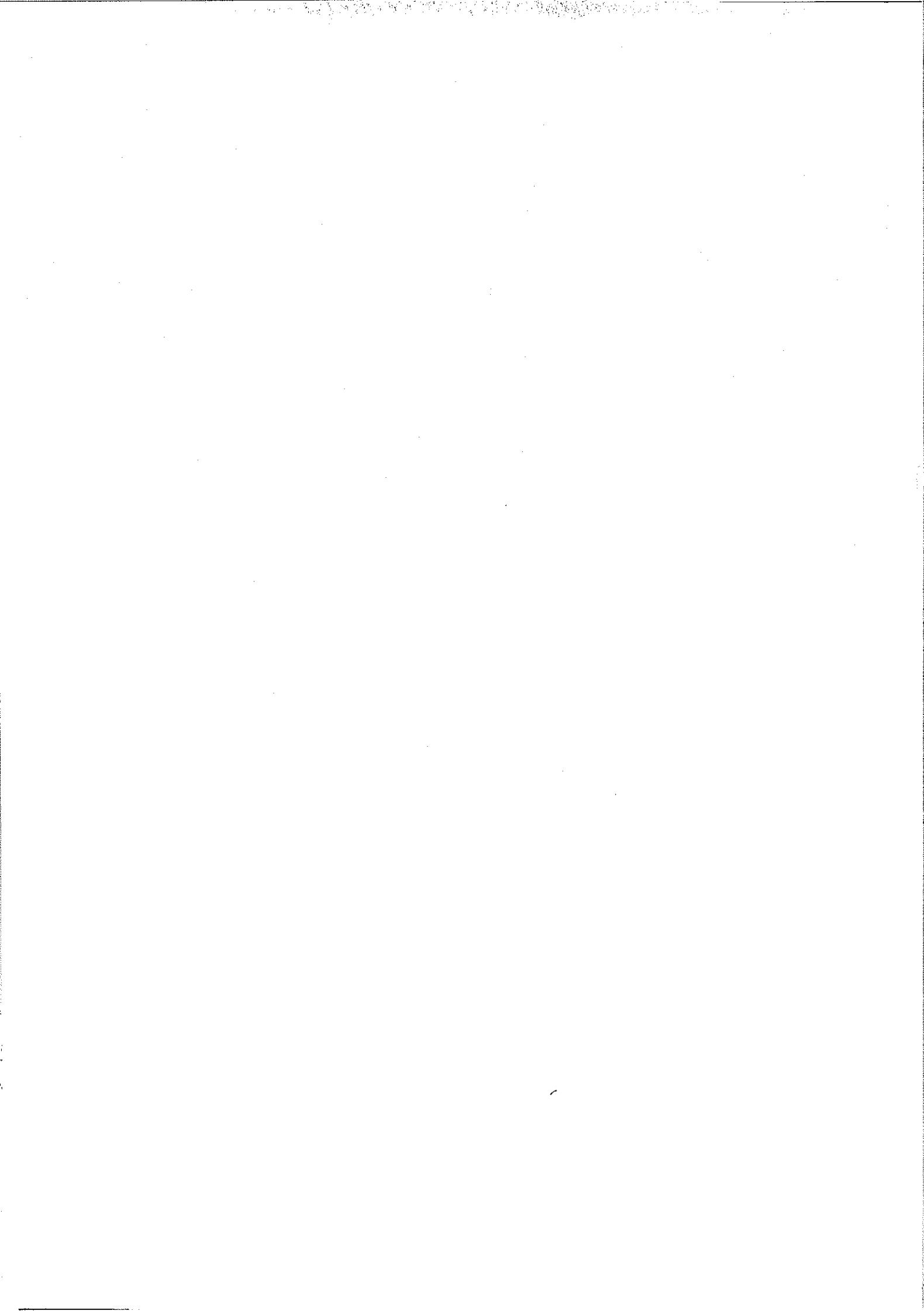
soit : $l = 20m$, $a = 2,5 \text{ m/sec}^2$, $\tau = 1 \text{ sec.}$

avec $n = 9$ véhicules par train

On trouve : $V_{\text{opt}} = 30 \text{ m/sec} = n 100 \text{ km/h}$

$$C = \frac{1}{12 + 1} = \frac{1}{13} \text{ train/sec} = 277 \text{ trains/h}$$

soit, en véhicules : $C = 9 \times 277 = 2.493 \text{ véh/h.}$



Cet exemple montre clairement l'intérêt de faire circuler les véhicules en trains pour tirer le meilleur parti de l'infrastructure.

3. CAS DES SYSTEMES A CANTONS FIXES :

La longueur des cantons est définie en général par les performances des trains les plus rapides empruntant la ligne, ou des trains ayant les moins bonnes capacités de freinage.

Par exemple, en supposant qu'une ligne soit empruntée quelques fois par jour par des trains de 250m roulant à 180 km/h, soit 50 m/sec, et capables de décélérer à 1 m/sec² : la longueur du canton sera au minimum de :

$$\frac{v^2}{2a} + v\tau + \ell = 1.500m$$

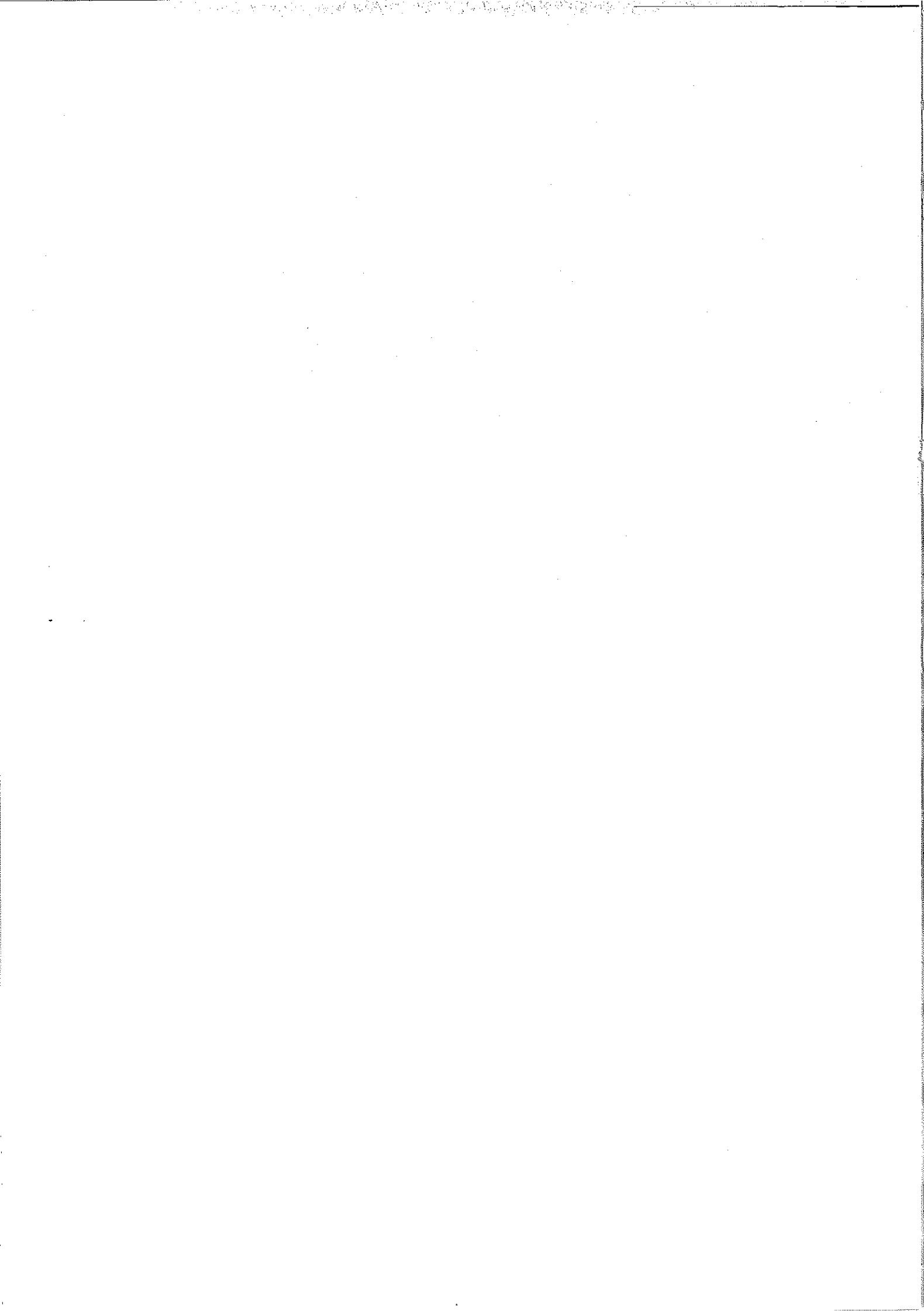
Cette longueur est tout à fait superflue pour des trains circulant à 100 km/h - soit 30 m/sec environ - qui n'exigent qu'un intervalle de l'ordre de 750m.

4. CAS DES VEHICULES ROUTIERS :

Les conducteurs automobiles ne respectent en général pas cette contrainte de sécurité du "mur de briques", et roulent de façon beaucoup plus rapprochée. Ceci se justifie en général car il est rare qu'un véhicule s'arrête brutalement sur la route sans une période de décélération préalable. Toutefois, un tel évènement peut se produire dans le cas de collisions en file où, à partir d'un certain rang, les véhicules peuvent s'arrêter très brusquement.

Sur des infrastructures chargées, il n'est pas rare d'obtenir des débits de 1.800 véh/heure, voire de 2.400 véh/heure, soit des intervalles de 1,5 à 2 secondes entre véhicules à des vitesses de l'ordre de 60 km/h - soit 16 m/sec environ.

A cette vitesse, l'hypothèse "mur de briques" conduirait, pour des véhicules de longueur $\ell = 5m$, de décélération $a = 5 m/sec^2$, avec $\tau = 1 sec.$, à un débit maximal de : 1.235 véh/heure.



Les chercheurs qui développent des simulations de trafic routier ont tenté de modéliser le comportement des véhicules en file (modèles dits de "car-following").

Un modèle couramment admis consiste à considérer que lorsque 2 véhicules se suivent, le 2ème règle son accélération en fonction de la distance et de la vitesse relative du véhicule précédent, conformément à la loi suivante :

$$\ddot{x}_n(t + \tau) = K \cdot \frac{\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)}{x_{n-1}(t) - x_n(t)}$$

τ étant un temps de réaction du conducteur



En intégrant, on trouve :

$$\dot{x}_n(t + \tau) = K \cdot \left\{ \log \left\{ x_{n-1}(t) - x_n(t) \right\} + C^{te} \right\}$$

La constante se calcule en supposant que les véhicules sont très près les uns des autres à l'arrêt, c'est-à-dire que pour

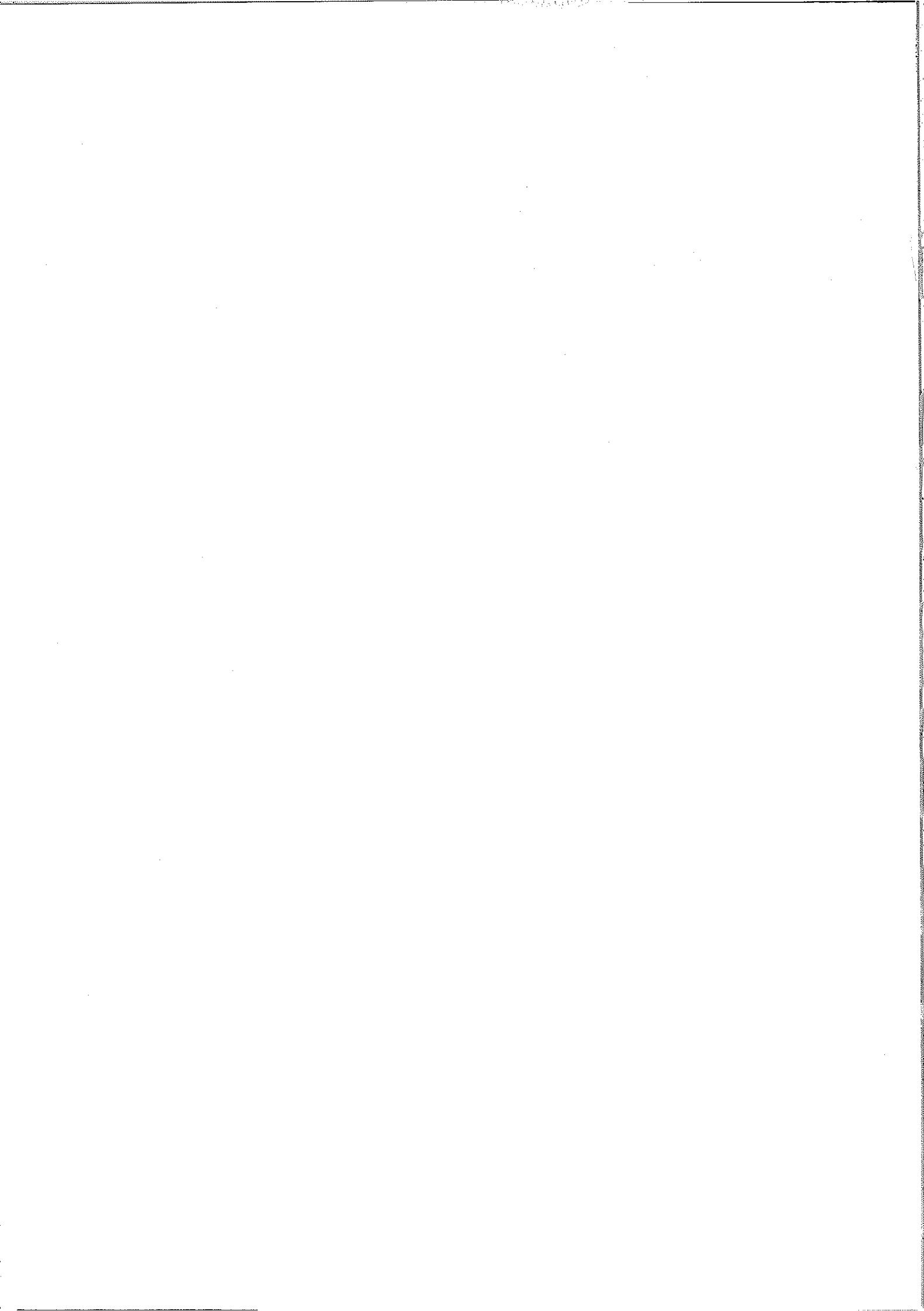
$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-1} = 0, \quad x_{n-1} - x_n = \ell$$

d'où la valeur de la constante : $-\log \ell$

$$\text{D'où : } \dot{x}_n(t + \tau) = K \log \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t)}{\ell}$$

En régime permanent, si on suppose les véhicules régulièrement répartis avec des espacements ℓ_n , on peut écrire :

$$V = \dot{x}_n(t + \tau) = K \log \frac{h}{\ell}$$



L'espacement moyen est donné en fonction de la vitesse par :

$$\ell_n = \ell e^{\frac{V}{K}}$$

et le débit maximal à la vitesse V est donné par :

$$Q = \frac{V}{h} = \frac{V}{\ell} e^{-\frac{V}{K}}$$

On voit que la courbe $Q_{\max} = f(V)$ a une forme qui se rapproche de celle que nous avons trouvée précédemment :

