

**Optimalisation de la capacité  
d'une  
ligne équipée en block automatique  
et  
exploitée par batteries**

2722

**Application au tronçon  
de ligne Paris-Juvisy**

**STATION**

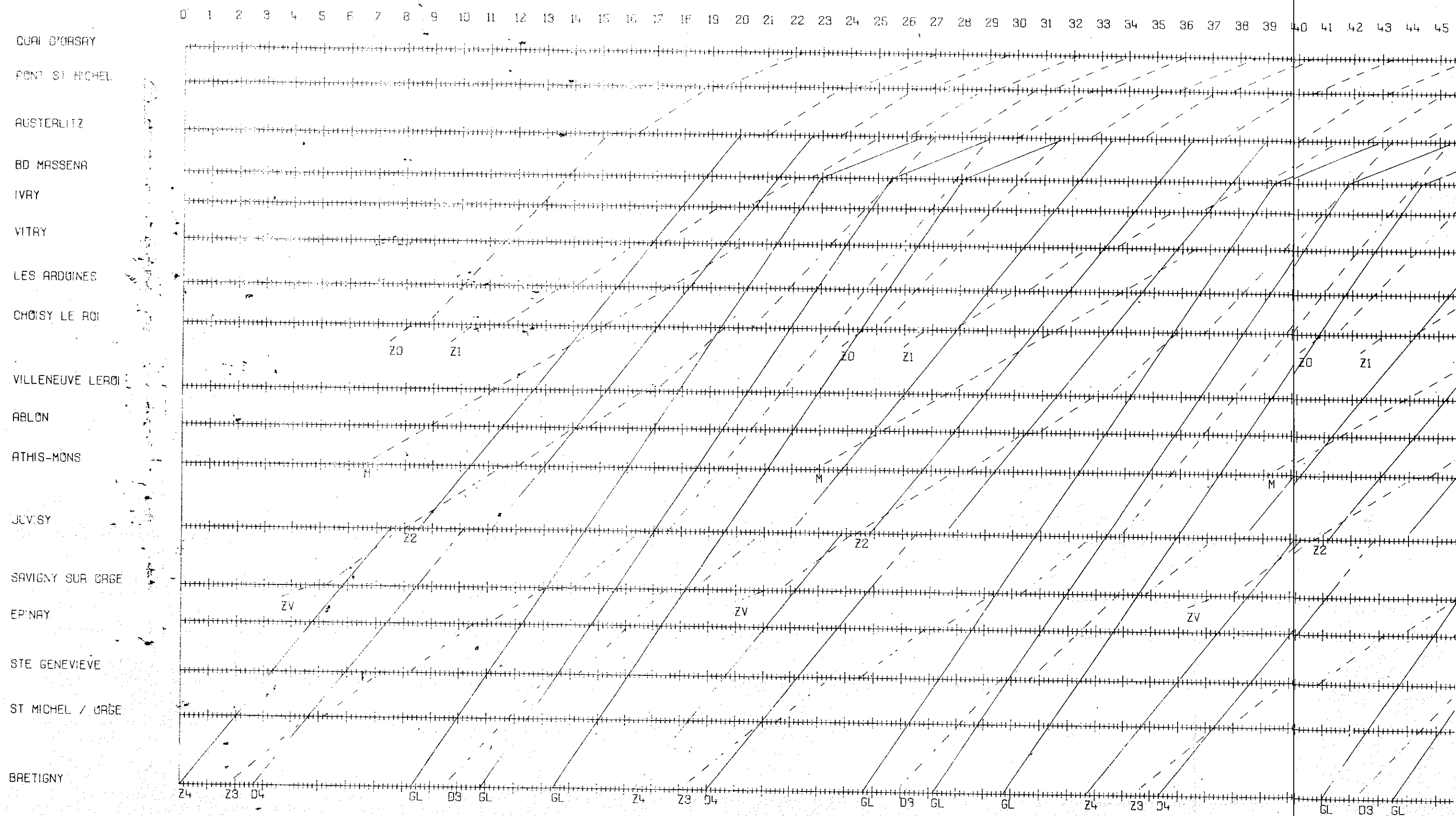
**Équipement Cybernétique**

**RECHERCHE**

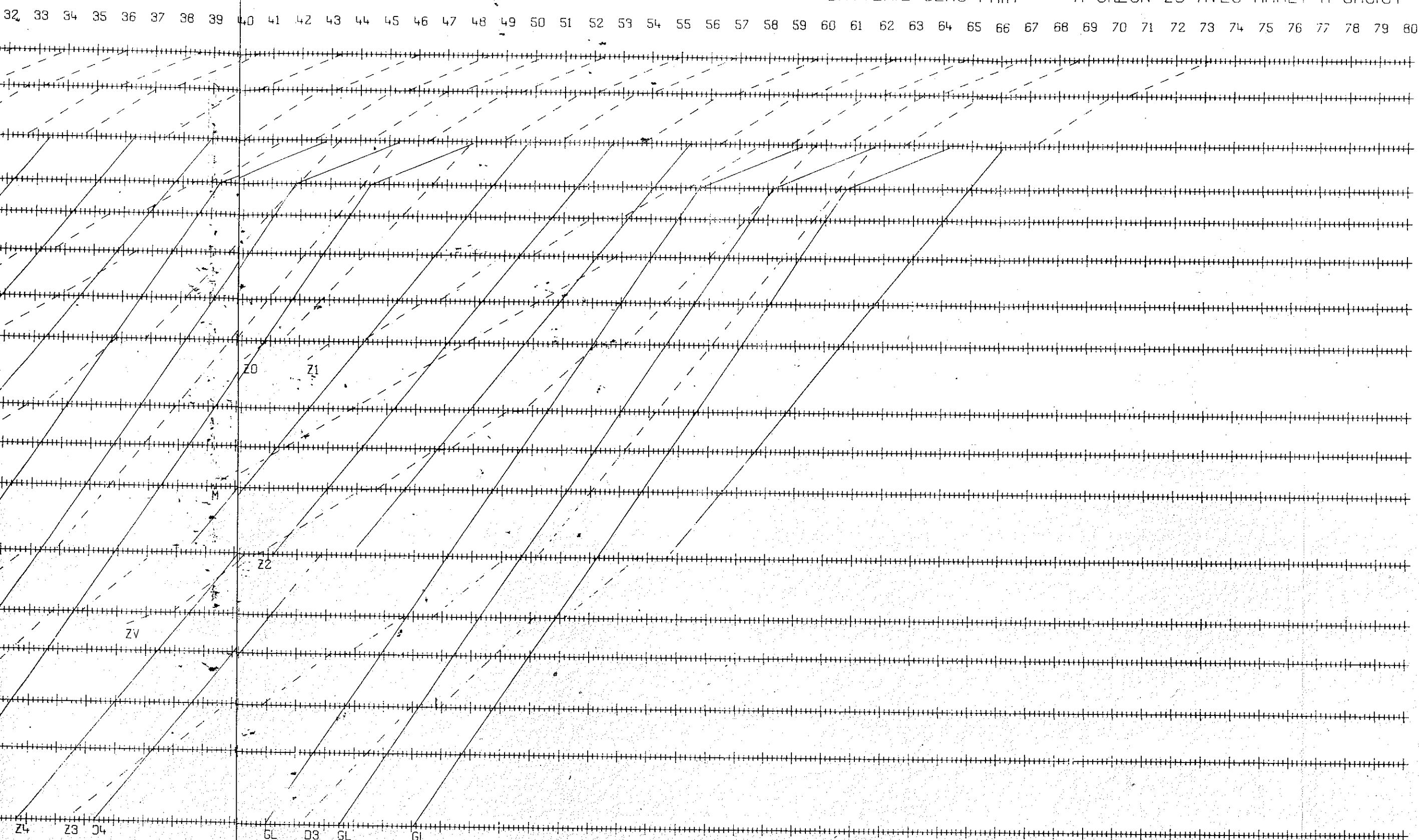


**CYCLE DE PERFECTIONNEMENT DES ATTACHÉS**

**Février 1970**



## BATTERIE SENS PAIR A SILLON ZO AVEC ARRET A CHOISY



DUREE DE LA BATTERIE

16 MN 20 S

BANLIEUES 25,8

GRANDES LIGNES 11,0

MESSAGERIES 3,6

RAMES VERSAILLES 3,6

TOTAL TRAINS HEURES 40,4

## LEGENDE

—— VOIE 2  
 --- VOIE 2BIS

Z0 A Z4 : ZONE 0 A ZONE 4

ZV : RAME VERSAILLES

D : DEROGATOIRES

M : MESSAGERIES

GL : GRANDES LIGNES

Graphique à sillons serrés  
 automatiquement établi par  
 ordinateur et table tracante

S.N.C.F.

-----  
Service de la Recherche  
-----

RK

CYCLE de PERFECTIONNEMENT  
des ATTACHÉS.

---

OPTIMALISATION de la CAPACITÉ d'une LIGNE  
EQUIPÉE en BLOCK AUTOMATIQUE et EXPLOITÉE  
par "BATTERIES"

Application au tronçon de ligne Paris - Juvisy

---

par A. LEMAIRE  
Chef du Département Cybernétique  
du Service de la Recherche



## SOMMAIRE

Le Service de la Recherche de la S.N.C.F. a été amené à effectuer, dans le cadre d'un Projet de Recherche "Automatisation de la circulation", des études théoriques et pratiques de débit sur des lignes équipées de block automatique et exploitées par batteries. Ces études ont pour but de déterminer la limite de débit possible, compte tenu de besoins et de contraintes, en introduisant judicieusement un certain degré d'automatisation pour permettre de rendre opérationnels les graphiques élaborés et en conservant, dans toute la mesure du possible, les infrastructures existantes.

La méthodologie fait appel, dans ses buts ainsi que dans ses moyens, aux sciences et techniques modernes du traitement des informations et il est possible, à partir des données et paramètres caractérisant les infrastructures et les contraintes Exploitation et Traction, de déterminer les débits optimaux et d'élaborer automatiquement des graphiques à sillons serrés.

L'exposé se présente comme suit :

- étude théorique d'analyse des paramètres entrant en jeu
- recherche de débit optimal
- exemple concret d'application : le cas "Paris-Juvisy"
- moyens cybernétiques à mettre en oeuvre pour rendre opérationnels les graphiques à sillons serrés élaborés automatiquement.

Ce dernier point concerne l'insertion de trains dans la zone à trafic dense Juvisy-Paris, la marche des automotrices de banlieue et les moyens à mettre à disposition du régulateur.

Quelques remarques sur les essais en cours complètent le présent exposé.

## INTRODUCTION

Devant l'accroissement du trafic de banlieue et grandes lignes convergeant vers certaines grandes gares de Paris, le Service de la Recherche a été amené à effectuer, en fonction de ces besoins, des études théoriques et pratiques de débit<sup>(1)</sup> sur des lignes équipées de block automatique et exploitées par "batteries", en vue de rechercher, pour des besoins donnés, la limite des débits possibles avec les infrastructures existantes. Les batteries sont répétitives pendant la période de pointe et composées de trains de caractéristiques techniques et de mouvements hétérogènes (rames automotrices de banlieue, trains de grandes lignes et trains de messageries). La méthodologie suivie fait appel, dans ses buts ainsi que dans ses moyens, aux sciences et techniques modernes en vue d'analyser le problème, de saisir les paramètres, de traiter des informations et d'élaborer automatiquement des graphiques à sillons serrés optimaux.

Il s'agit bien entendu d'un travail d'équipe, réalisé dans le Département Cybernétique du Service de la Recherche et traité sur les ordinateurs de la Direction des Etudes Générales, IBM 1800 muni d'une table traçante et UNIVAC 1108<sup>(2)</sup>.

Les moyens utilisés relèvent, comme on va pouvoir le constater, des mathématiques et de l'informatique.

Les étapes successives sont les suivantes :

- étude théorique en vue de circonscrire les paramètres,
- recherche automatique du débit optimal,
- exemple pratique : Paris - Juvisy,
- moyens cybernétiques pour rendre opérationnels les graphiques à sillons serrés élaborés afin d'accroître le débit des infrastructures existantes.

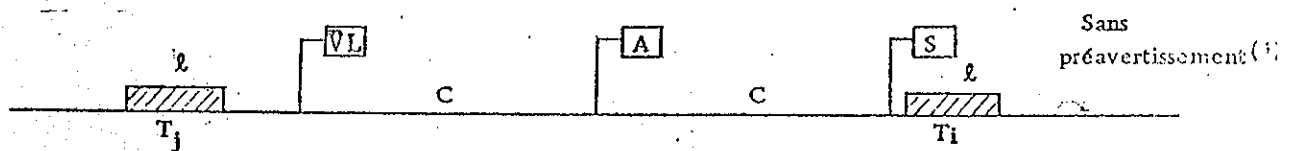
(1) La notion de capacité est directement liée au débit pour une ligne exploitée avec des trains de longueurs données compte tenu du matériel et des infrastructures existants.

(2) Des informations complémentaires seront données dans la Revue Générale des Chemins de Fer concernant ces études, en particulier, sur l'analyse et la programmation et sur les résultats des essais concernant l'application Paris-Juvisy.

## TUDE THEORIQUE

Il convient, en premier lieu, de bien définir la notion de débit. On va considérer d'abord le cas de deux trains en succession sans arrêt sur une ligne équipée de block automatique, sans préavertissement<sup>(1)</sup>, à cantons homogènes, afin de dégager les paramètres et des lois assez générales. La formule simplifiée trouvée sera ensuite généralisée, en tenant compte de cantons non homogènes, de la longueur réelle des trains, des caractéristiques de traction et de freinage, des durées de stationnement dans les gares, des marches hétérogènes des trains, du respect de la précision des marches et enfin, d'un réseau comportant des convergences et cisaillements.

### 1.1 - Cas simplifié



- $T_1$  = premier train
- $T_2$  = deuxième train
- $l$  = longueur du train
- $C$  = longueur du canton

Figure 1 - Circulation de deux trains  $T_1$  et  $T_2$  en succession.

Soit deux trains  $T_1$  et  $T_2$  se suivant en pleine voie, sur une ligne équipée de block automatique (cf. fig. 1) la circulation devant se faire, par hypothèse, sans contrainte pour le conducteur (c'est-à-dire en lui permettant une perception de la voie libre avec une marge exprimée en secondes : le deuxième train aborde chaque canton au plus tôt  $x$  secondes après sa mise à voie libre).

Cette marge minimale désignée par le symbole  $x$  est représentative de la précision  $p$  avec laquelle s'effectue le mouvement par rapport à la marche qui a servi à élaborer les graphiques et tient compte, en outre, du temps de visibilité  $\alpha$  de l'état de voie libre. Pour être opérationnel, l'intervalle de temps  $\tau$  qui sépare ainsi deux trains et dont l'inverse caractérise le débit<sup>(2)</sup> doit tenir compte de cette marge  $x = 2p + \alpha$  ; en effet, le premier train peut être en "retard" de  $p$  par rapport à sa marche et le second peut être en "avance" également de  $p$ . On voit déjà apparaître une notion relative du débit pour une ligne car ces valeurs  $p$  peuvent avoir un certain caractère aléatoire et ne sont saisies que par des valeurs statistiques et d'écart probable.

(1) La présence d'un préavertissement conduirait au même processus sauf qu'il conviendrait de considérer trois cantons au lieu de deux.

(2) Par exemple, le débit horaire dans le tronçon de voie considéré si les trains suivaient des marches homogènes seront de :

$$\Delta = \frac{3\,600}{\tau}$$



L'intervalle  $\tau$  est donné en fonction des hypothèses fixées et de la terminologie adoptée (C : longueur des cantons homogènes, L : longueur homogène des trains, V : vitesse des trains sur les cantons C) par l'inégalité suivante :

$$\tau \geq \frac{2C + L}{V} + \chi \quad (1)$$

Or, la longueur des cantons est fixée par la réglementation en fonction de données empiriques tenant compte notamment des caractéristiques des trains, notamment des possibilités de freinage, et du profil de la ligne. En première approche, la longueur des cantons est de la forme  $C = d + m$  <sup>(1)</sup>

- d étant, d'une manière globale, une fonction parabolique de la vitesse

$$d = A_0 V^2 + A_1 V + A_2$$

- m, une marge de sécurité fixée par la réglementation (de l'ordre de 50 à 100 m)

$$\text{ainsi : } C = d + m = A_0 V^2 + A_1 V + A_2 + m = A_0 V^2 + A_1 V + m'$$

$$\text{avec } m' = m + A_2$$

L'inégalité (1) devient alors en posant

$$L' = 2m + 2A_2 + L = L + 2m' \quad \text{et} \quad \tau' = \tau - \chi - 2A_1$$

$$\tau' \geq 2A_0 V + \frac{L'}{V} \quad (2)$$

Le cas d'égalité dans (2) détermine une surface S ; les valeurs possibles pour  $\tau'$  sont celles qui correspondent aux points situés "au-dessus" de cette surface.

1.11 - Coupe de la surface S par des plans paramètres en  $L' = \text{constante}$  (figure 2) <sup>(2)</sup>.

La courbe  $\tau = F(V, L')$  avec  $L' = \text{constante}$  présente un mini mum puisqu'elle est la somme d'une droite et une hyperbole (ou encore parce que  $\frac{d\tau}{dV}$  s'annule pour  $2A_0 V^2 = L'$ ).

(1) La formule la plus utilisée jusqu'à ce jour est celle de Pédélucq :

$$C = \frac{\phi V^2}{1,093375 \lambda + 0,127 - 0,235 i \phi}$$

dans laquelle :

d = distance de freinage

V = vitesse de la ligne

$\lambda$  = coefficient caractérisant l'aptitude au freinage du train

i = déclivité en mm/m ( $< 0$  pour une pente,  $> 0$  pour une rampe)

$\phi$  = fonction expérimentale liée à la vitesse.

(2) page 4.

est  $\tau'_0 = \frac{L'}{4\Lambda_0 V_0}$  pour une vitesse de :

$$V_0 = \sqrt{\frac{L'}{2\Lambda_0}} \quad (\text{cf. figure 2 ci-dessous})$$

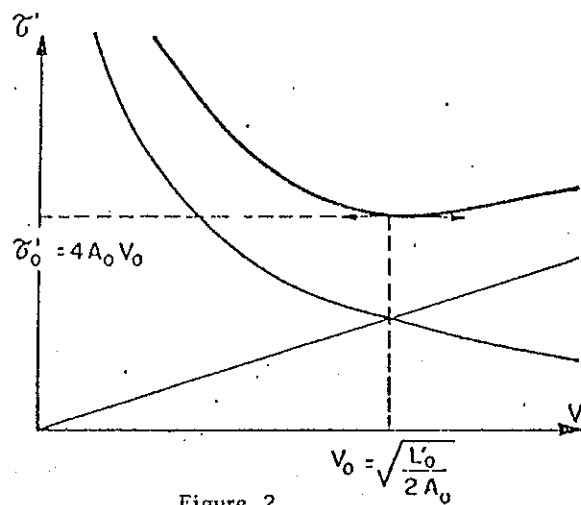


Figure 2

Variation de l'intervalle  $\tau'$  en fonction de la vitesse. Existence d'un intervalle minimal permettant un débit optimal pour une vitesse  $V_0$ .

Pour différentes longueurs de trains  $L'_1 < L'_2 < L'_3$  le lieu de  $\tau'_0$  est donc une droite et les intervalles minimaux suivent la loi présentée à la figure 3 ci-dessous:

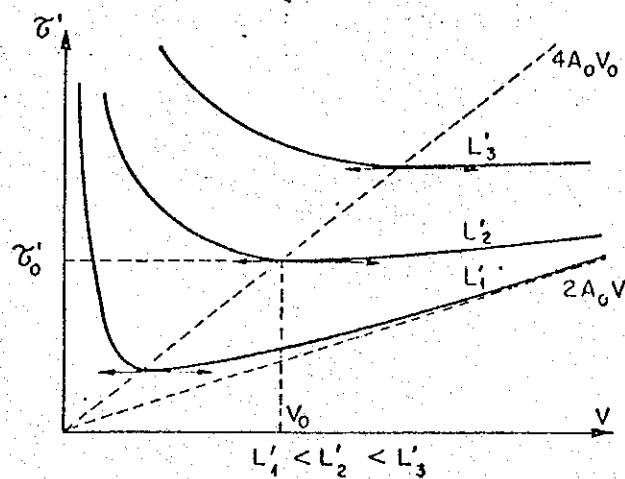


Figure 3

Variation de l'intervalle  $\tau'$  en fonction de la vitesse  $V$  et de la longueur  $L' = L + 2m'$  ( $L$ : longueur des trains)

Il existe donc une vitesse optimale pour le débit et la longueur du canton est alors :

$C_o = \Lambda_o V_o^2 + \Lambda_1 V_o + \Lambda_2 + m$  qui, tout calcul fait, est sensiblement égal, en première approche à  $\Lambda_o V_o^2 + m$  compte tenu des valeurs numériques des autres coefficients.

Cette étude simplificatrice avait simplement pour but de montrer qu'il existait une vitesse optimale pour le débit en ligne. Il s'agit là d'ailleurs d'une conclusion générale qu'on rencontre dans toutes les études de débit, non seulement dans le domaine des chemins de fer, mais, également, dans le domaine routier où l'espacement entre mobiles est fonction aussi des caractéristiques de freinage dans l'environnement de l'infrastructure spécifique.

### 1.12 - Exemple numérique

Afin de donner un ordre de grandeur des valeurs pratiques dans ce cas simplifié, la figure 4 ci-dessous donne la variation de l'intervalle  $\tau'$

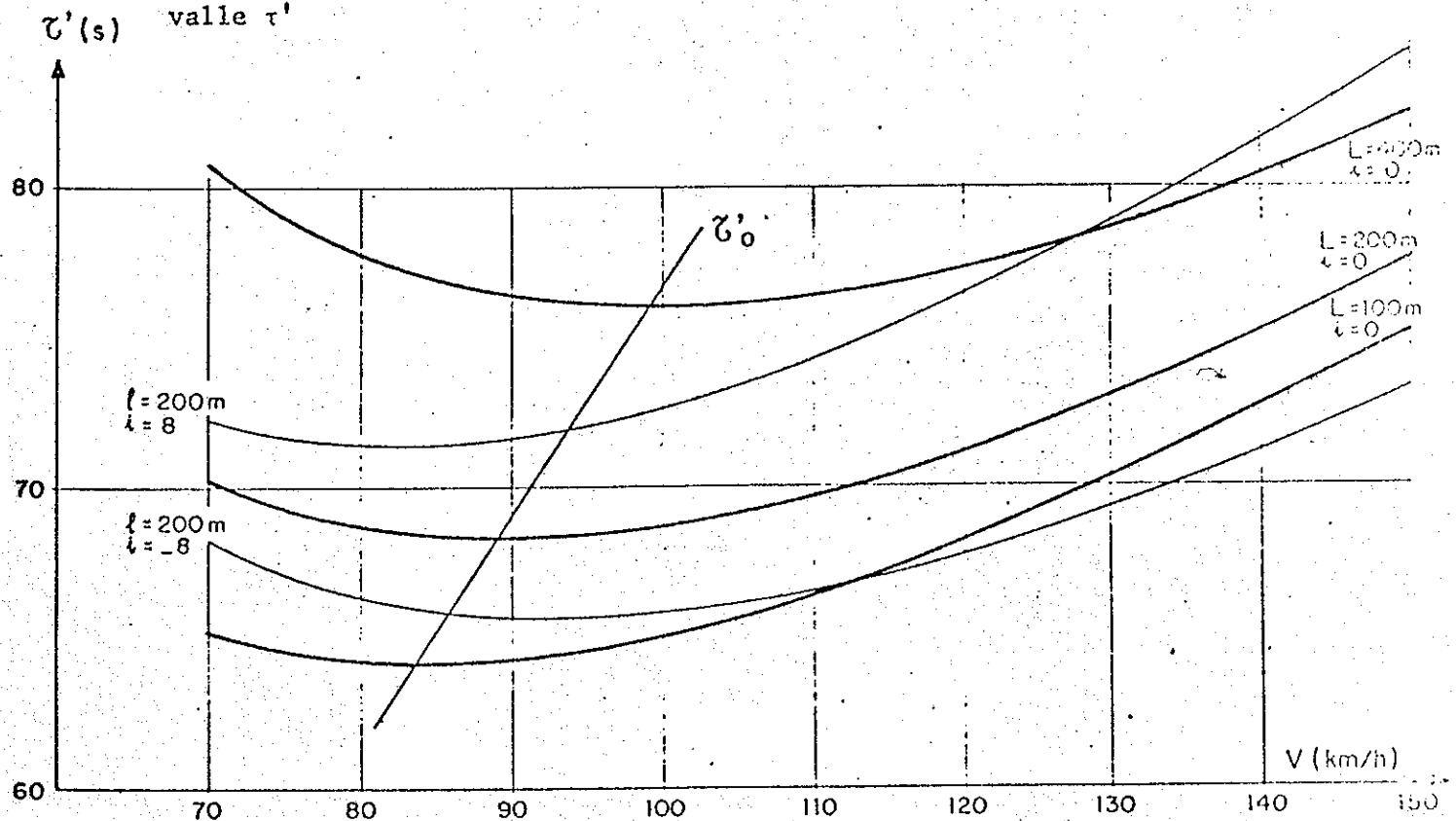


Figure 4

Variation de l'intervalle entre trains  
en fonction de la vitesse pour différentes  
longueurs de trains, déclivité de la voie  
et pour une valeur de  $\lambda = 1,1$ .

devant exister entre deux trains à marches homogènes en block automatique afin que le second train rencontre toujours le feu de voie libre pour différentes longueurs de trains et valeurs du coefficient  $i$  caractéristique du profil.

Pour pouvoir utiliser d'une manière continue la formule de Pédelucq, cette dernière a été représentée sous forme d'une parabole en utilisant la méthode des moindres carrés pour  $\lambda = 1,1$  et  $i = 8,0$  et  $- 8$  mm/m.

Pour obtenir l'intervalle réel  $\tau$  il convient d'ajouter, en première approche, à  $\tau'$  la marge  $\chi$  précédemment définie.

Les conclusions sont les suivantes :

La longueur des trains circulant sur la ligne étant  $L_0$ , il existe une vitesse optimale  $V_0$  de circulation (et par voie de conséquence une longueur de canton optimale) autorisant le plus grand débit de trains possible : à  $V_0$  correspond en effet l'intervalle minimal  $\tau_0$ .

Pour fixer les idées dans le cas de trains de 400 m, la vitesse optimale est de 99 km/h sur une ligne en palier dont la longueur optimale des cantons est 850 m. Le débit maximal obtenu conduit à la circulation d'un train toutes les 101 secondes avec une marge  $\chi$  de 25 secondes.

Pour les rames de 200 m, on obtient une vitesse optimale de 88 km/h et un intervalle de 93 secondes avec des cantons de 725 m avec  $\chi = 25$  secondes.

En pratique comme les cantons, les vitesses, les caractéristiques de freinage, les longueurs des trains et les profils ne sont pas homogènes, il est difficile de parler de vitesse optimale et donc de débit optimal. En effet les cantons longs nécessaires pour les trains rapides freinent le débit des trains moins rapides ; ainsi l'hétérogénéité des caractéristiques conduit à la recherche d'une méthode plus élaborée, permettant de saisir les paramètres réels sans toutefois changer fondamentalement les lois générales mises ici en lumière et d'établir de manière automatique des graphiques à sillons serrés correspondant à une certaine optimisation du débit d'une ligne donnée, prise dans un réseau : c'est l'objet du second chapitre de cet article.

## 2 - ELEMENTS FONDAMENTAUX et RECHERCHE AUTOMATIQUE du DEBIT OPTIMAL

### 2.1 - Détermination des matrices de contraintes de signalisation

La méthode consiste à considérer l'intervalle de temps  $0_j^i$  qui doit séparer, à l'origine du tronçon de ligne considéré, la tête de deux trains successifs  $T_i$ ,  $T_j$  pour que le deuxième aborde chacun des panneaux au plus tôt  $\chi$  secondes après sa mise à voie libre,  $\chi$  étant une marge, définie précédemment.

Les cantons et les panneaux sont répartis suivant une configuration réelle correspondant à une ligne à étudier et sont "indexés" de façon que le panneau de rang  $n$  protège le canton de rang  $n$ . Les marches possibles des trains, les temps de stationnement, les signaux équipés de préavertissement ainsi que certaines contraintes d'exploitation (par exemple, la nécessité d'assurer des correspondances) sont à prendre en considération.

## 2.11 - Méthode utilisée

On recherche successivement pour chaque panneau  $S_n$  l'intervalle  $\theta_{j,n}^i$  correspondant.

Pour la succession  $T_i$  et  $T_j$  considérée, le temps  $\theta_{j,n}^i$  affecté au tronçon sera égal à la plus grande valeur prise par les  $\theta_{j,n}^i$ .

$$\theta_{j,n}^i = \sup_{(n)} \left[ \theta_{j,n}^i \right]$$

avec  $1 < n < 9$  si le tronçon comporte, par exemple, 9 cantons.

On appellera débit  $\Delta$  de la ligne le nombre de trains susceptibles de l'emprunter pendant l'unité de temps, par exemple une heure, les trains circulant à voie libre par définition.

## 2.2 - Calcul de l'intervalle séparant deux trains successifs

Les calculs des expressions donnant un élément  $\theta_{j,n}^i$  conduisent aux formules respectives ci-après, pour un panneau ne comportant pas de préavertissement et pour un panneau comportant un préavertissement :

$$\theta_{j,n}^i \geq x + t_{i(n+1)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+1} (t_{ik} + a'_{ik}) - \sum_{k=1}^{k=n-1} (t_{jk} + a'_{jk}) \quad (3)$$

$$\theta_{j,n}^i \geq x + t_{i(n+2)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+2} (t_{ik} + a'_{ik}) - \sum_{k=1}^{k=n-1} (t_{jk} + a'_{jk}) \quad (4)$$

avec :

$n$  = indice du panneau abordé par le train  $T_j$

$t_{ik}^d$  = temps de dégagement du canton de rang  $k$  par le train  $T_i$  à partir du moment où la tête du train  $T_i$  a engagé le canton de rang  $k+1$ .

$t_{ik}$  = temps de parcours par la tête du train  $T_i$  du canton de rang  $k$

$a'_{ik}, a'_{jk}$  = temps tenant compte des arrêts et des temps de décélération et de réaccélération des trains  $T_i$  et  $T_j$  dans le canton de rang  $k$ .

On trouvera en annexe I l'établissement des formules (3) et (4) et la détermination des temps  $a'_{ik}$  et  $a'_{jk}$ .

### 2.3 - Elaboration et utilisation des matrices de contrainte de signalisation

On suppose que la batterie empruntant le tronçon de ligne étudié, comporte  $M$  trains. A l'aide des formules (3) et (4), il est possible de calculer pour chaque panneau  $S_n$  du tronçon de ligne, l'intervalle  $\theta_{jn}^i$  séparant à l'origine du tronçon de ligne, l'intervalle de passage de deux trains successifs  $T_i$  et  $T_j$  pris parmi ces  $M$  trains. La comparaison de chaque  $\theta_{jn}^i$  permet de déterminer l'intervalle  $\theta_j^i$  entre ces deux trains successifs  $T_i$  et  $T_j$  assurant le passage de tous les panneaux  $S_n$  de la ligne au feu de voie libre, le(s) plus péjorant(s) étant vu(s) avec un temps de visibilité d'au moins  $\alpha$  secondes, dans le cas où deux trains en succession se présentent de la manière la plus défavorable, le premier étant en retard de  $p$  et le second en avance de  $p$  sur l'horaire.

L'opération est recommencée pour chaque couple de trains jusqu'à épuisement des combinaisons des  $M$  trains pris en considération. On peut alors dresser un tableau qui sera appelé matrice de contraintes de signalisation, donnant pour chaque couple  $T_i$  et  $T_j$  les  $\theta_j^i$  correspondants.

Comme le montre la figure 5 ci-après :

1 <sup>er</sup> train 2 <sup>e</sup> train	1 2 3 ... 4 ...				
	1	2	3	...	4 ...
1	$\theta_1^1$	$\theta_1^2$	$\theta_1^3$	...	$\theta_1^4$ ...
2	$\theta_2^1$	$\theta_2^2$	$\theta_2^3$	...	$\theta_2^4$ ...
...	...	...	...	...	...
j	$\theta_j^1$	$\theta_j^2$	$\theta_j^3$	...	$\theta_j^4$ ...
...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...

Figure 5

Matrices de contraintes de signalisation

les matrices ainsi constituées peuvent être utilisées de deux manières :

- a) Lors du calcul des  $O_j^i$ , il peut être mis "en mémoire" les panneaux  $S_n$  donnant les  $O_j^i$  des plus importants, c'est-à-dire les panneaux les plus péjorants pour le débit de la ligne. A chaque  $O_j^i$  de la matrice d'espacement, on peut alors rattacher le (ou les) panneau(x) le(s) plus péjorant(s) pour le débit.

L'analyse de l'ensemble des éléments de la matrice fait apparaître ainsi le (ou les) point(s) critique(s) dont l'élimination serait bénéfique pour le débit. On trouve là une méthode d'amélioration d'une signalisation.

- b) Les M trains étant considérés en totalité, pour chaque ordonnancement (permutations des M trains), le calcul de la somme des intervalles minimaux séparant les trains deux à deux à l'origine du tronçon de ligne étudié donne les différents débits réalisables sur celui-ci et ceci pour l'ensemble des M trains considérés.

On fait apparaître là une méthode de recherche de débits optimaux sur des lignes à exploitation cadencée (exploitation par batteries). C'est cette application de la méthode présentée qui va être explicitée.

## 2.4 - Recherche automatique de débit optimal

Soit un réseau comportant un certain nombre de voies non banalisées et un certain nombre de divergences et convergences. Sur ce réseau, on veut faire circuler dans un temps le plus court possible un ensemble de M trains.

L'application de la méthode décrite nécessite les traitements en ordinateur dès que le réseau n'est plus extrêmement simple et que le nombre M dépasse quelques unités. A noter, également, qu'il n'est plus raisonnable de mettre en oeuvre la méthode, eu égard aux temps et coûts de traitement et aux capacités des ordinateurs actuels pour un nombre trop élevé de trains : le chiffre d'une dizaine de trains est apparu comme limite pratique. La méthode est donc particulièrement applicable à une exploitation par batteries, caractéristiques des lignes convergentes sur un grand centre comme Paris, avec des trains de banlieue desservant des "zones" dont le nombre est en général inférieur à cinq, des trains de grandes lignes à marches relativement homogènes et des trains de messageries.

L'application de la méthode de recherche de débit conduit, après avoir défini le réseau et les matrices de contraintes pour les couples de l'ensemble des M trains, à l'établissement pour chaque ordonnancement, de la somme des intervalles nécessaires entre trains.

Aux permutations des M trains se juxtaposent les sous-permutations dues aux possibilités pour un même train de prendre des itinéraires différents (changements de voies).

Il est donc nécessaire de construire une logique engendrant toutes les permutations et sous-permutations relatives aux M trains. Cette logique détermine pour chaque permutation / sous-permutation (ou en langage de l'exploitant : chaque batterie) son module c'est-à-dire la durée entre le passage en un point de la ligne du premier train de la batterie et le passage au même point du premier train de la batterie suivante.

La logique utilisée permet de classer les batteries dans l'ordre des modules croissants.

Parmi le lot de batteries, il y en a une (ou plusieurs) dont le module est le plus réduit et qui donne(nt) donc le meilleur débit. Mais il y a, à ce stade des réflexions, une remarque très importante à faire : la (ou les) batterie(s) donnant le meilleur débit n'est (ne sont) peut-être pas valable(s) pour l'Exploitation.

Par exemple, si l'on dispose de deux voies de même sens pour écouler le trafic des M trains, il se peut que les omnibus doivent circuler obligatoirement sur l'une des deux voies qui dispose seule de quais pour les voyageurs ; une autre contrainte, également, consiste à assurer des correspondances entre certains trains dans des conditions données.

Il y a intérêt à éliminer alors les batteries correspondantes le plus tôt possible afin d'éviter les traitements inutiles en ordonnateur. Le nombre total de batteries possibles auquel on parvient est en effet très vite considérable. A titre d'exemple, dans le cas de Paris-Juvisy, il est de l'ordre de 30 millions. Ce chiffre a été ramené à environ 500 000 en tenant compte des contraintes de l'Exploitation.

C'est parmi ce lot restant que sera (seront) dégagée(s) la (les) batterie(s) au module le plus petit. Elle(s) sera (seront) appelée(s) optimale(s).

Cette optimisation du débit est donc relative et spécifique à une exploitation par batteries dans le cadre de contraintes d'infrastructures (appareils voies - quai), de signalisation (découpage des cantons de BAL et délai de réponse des installations des postes pour établir les itinéraires), de performances du matériel (engins de traction et freinage), en particulier, du respect de la précision des marches en tout point du réseau et d'exploitation (types de trains dans une batterie, correspondances d'affectation des quais, politique de régulation en fonction des priorités).

Connaissant la meilleure batterie ainsi définie (durée et ordonnancement) pour un besoin donné de M trains, il est alors possible d'établir à l'aide des marches types de chaque train et des durées de stationnement dans les gares un programme qui permet d'obtenir directement sur une table traçante le graphique dit à sillons serrés.



L'organigramme du processus d'obtention de batteries optimales qui conduisent à des graphiques à sillons serrés par traitement automatique sur ordinateur est alors celui présenté à la figure 6.

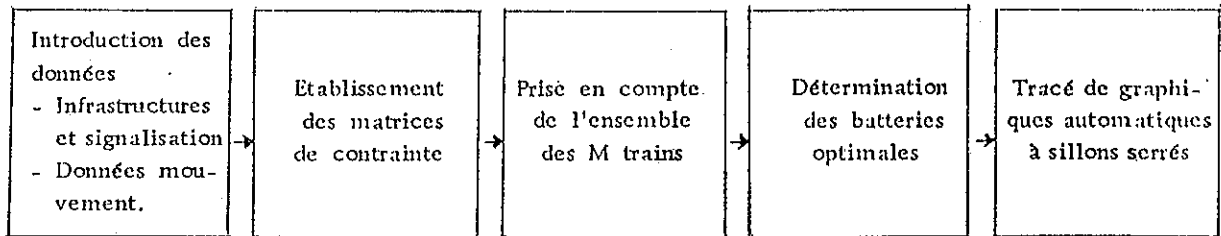


Figure 6

### 3 - EXEMPLE PRATIQUE - PARIS - JUVISY

Le "projet : PARIS - JUVISY" <sup>(1)</sup> consiste à rechercher si une automatisation judicieuse permettrait d'augmenter le débit et la fluidification des circulations sur les voies paires entre Juvisy et Paris et ainsi de différer ou même d'éviter la construction coûteuse d'une cinquième voie.

Le débit maximal à l'heure de pointe semble être pratiquement atteint avec les installations actuelles ; il est de 18 trains de banlieue, 10 trains de grandes lignes en provenance des Aubrais et 4 trains de messageries entre Choisy et Vitry.

La méthodologie utilisée découle directement de la mise en oeuvre des moyens précités, qui ont permis de préciser certains paramètres afin de définir les performances des automatismes devant répondre aux critères du débit maximal et de la fluidification ; cette dernière consiste, d'une part, à insérer les trains de grandes lignes dans une grille serrée de trains de banlieue aux abords de Juvisy et, d'autre part, à assurer au mieux l'entrée des trains de banlieue dans la nouvelle gare souterraine d'Austerlitz.

#### 3.1 - But à atteindre : débit maximal des voies paires avec modification minimale des infrastructures.

L'exploitation de la desserte de la banlieue de la Région Sud-Ouest est caractérisée par des batteries comprenant 4 types de trains correspondant à un découpage de la banlieue en zones de dessertes :

(1) Projet formulé par la Direction du Mouvement et confié au Service de la Recherche en Commission de la Recherche de juillet 1967.

- Zone 1 : trains Orly - Paris omnibus
- Zone 2 : trains Juvisy - Choisy omnibus et Choisy - Paris directs
- Zone 3 : trains Brétigny - Juvisy omnibus et Juvisy - Paris directs
- Zone 4 : trains Etampes (Dourdan) - Brétigny omnibus et Brétigny - Juvisy puis Juvisy - Paris directs.

Outre ces trains, de sigles respectifs  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_3$  et  $Z_4$ , des trains dits dérogatoires (de sigle D) circulent en heure de pointe et ne desservent que certaines gares.

Des sillons directs Choisy - Paris <sup>(1)</sup> (sillons dits  $Z_0$ ) sont envisagés.

Le nombre de sillons de grandes lignes doit être le plus élevé possible (environ d'une douzaine à l'heure de pointe).

La composition de la batterie de base est donc :

$$1 Z_0, 1 Z_1, 1 Z_2, 1 Z_3, 1 Z_4, 1 D_3, 1 D_4, X GL \text{ et } 1 M \quad (5)$$

La première phase a consisté à élaborer les matrices contraintes de signalisation présentées au paragraphe 2.3 en utilisant les marches données par la Division des Etudes de Traction Electrique pour les différents types de trains sur les parcours considérés, les temps de stationnement souhaités par la Région du Sud-Ouest et enfin un découpage rationnel du Block Automatique Lumineux (BAL)<sup>(2)</sup>. De plus, pour obtenir des débits importants aux points singuliers, convergence, divergence et cisaillement et afin de réduire les temps de réponse, des postes type PRS ont été envisagés dès l'origine de l'étude à Choisy, Juvisy et Paris.

Il est facile de comprendre que ces temps de réponse, entrant dans les temps  $\theta_j^i$ , ont une grande importance sur le débit puisqu'ils sont de l'ordre des dizaines de secondes avec des PRS, et de l'ordre de la minute avec des postes électromécaniques répartis le long de la ligne.

Les formules utilisées précitées (3) et (4) montrent :

- d'une part, l'importance de la marge  $\chi$  qui caractérise, non seulement une possibilité pour le conducteur de voir le feu de voie libre pendant un temps convenable, mais, également, la précision de la marche des trains en succession en chaque point de la ligne ;
- d'autre part, l'incidence des caractéristiques de démarrage et d'arrêt du matériel moteur et enfin l'importance sur le débit du respect des temps de stationnement.

Un certain nombre de solutions ont été étudiées dans le cadre d'hypothèses générales et particulières. On va présenter ici, pour illustrer la méthode, une solution assez représentative d'une telle étude de débit et ensuite on discutera de l'incidence des valeurs des paramètres  $\chi$  et des temps de stationnement.

(1) Mais omnibus entre Paris-Austerlitz et Paris-Orsay car si on veut obtenir un débit acceptable entre ces deux gares, il est nécessaire de maintenir des marches parallèles.

(2) En appliquant la méthode d'amélioration d'une signalisation (cf § 2.3), la méthode fait converger rapidement et quelques itérations ont permis de voir qu'il était intéressant d'implanter, de déplacer ou modifier 30 à 40 % des panneaux.

Cette analyse permettra de caractériser les performances des automatismes et les moyens à mettre en oeuvre pour réaliser un système opérationnel donnant un débit suffisant pour permettre à la Région du Sud-Ouest de répondre à ses besoins, dans la mesure, bien entendu, où les expérimentations en cours<sup>(1)</sup> correspondront bien aux hypothèses.

### 3.2 - Sillons serrés élaborés automatiquement correspondant à la composition de la batterie souhaitée (composition décrite en (5)).

Les hypothèses sont les suivantes :

Hypothèses générales :

- Gare souterraine d'Austerlitz avec PRS
- Postes PRS à Juvisy et Choisy
- Temps de stationnement dans les gares et points d'arrêts respectés (en général 30 s. sauf 1 mn à Brétigny - Ste-Geneviève - Savigny - Juvisy - Choisy - Ivry - Vitry et Austerlitz)
- Chronométrie réalisant une synchronisation de l'heure
- Parc homogène de rames (Z 5 300) à marche programmée type DETE<sup>(2)</sup>
- longueur des trains de banlieue de 205 m (2 automotrices + 3 remorques)
- $x = 25$  s.

Hypothèses particulières :

- BAL redécoupé conformément aux études
- Voie paire supplémentaire à Choisy.

Avec les hypothèses ci-dessus, la méthode d'élaboration de graphiques à sillons serrés a conduit, pour une batterie de composition (5) au module de 16 mn 20 s. On trouvera, en annexe 2, le graphique correspondant fourni directement par l'ordinateur à l'aide d'une table traçante.

Avec d'autres hypothèses particulières et d'autres compositions de batteries on a trouvé des modules variant de 13 mn 24 s à 16 mn 53 s.

On trouve ainsi un débit horaire d'une quarantaine de trains, dont 23 à 26 trains de banlieue, 11 à 13 trains de grandes lignes et 4 trains de messageries soit une augmentation globale du débit actuel (32 trains) d'environ 30 %.

### 3.3 - Incidence sur le débit des valeurs du paramètre $x$ et des temps de stationnement.

#### 3.31 - Incidence du paramètre $x$

Le paramètre  $x$  qui a été pris dans l'exemple (5) est égal à 25 s. (+ 10 s. pour la précision des marches des trains en succession et 5 s. pour permettre au conducteur la perception du signal le plus péjorant à la voie libre<sup>(3)</sup>) va prendre ici successivement des valeurs supérieures et inférieures à 25 s, soit 55, 45, 35, 15 et 5 secondes.

(1) ces expérimentations en cours feront l'objet de publications ultérieures

(2) une étude est en cours pour des marches programmées habituellement utilisées par la Région Sud-Ouest (détente plus importante)

(3) Si le 1er train est en retard de 10 s. sur son horaire et le second en avance de 10 s. sur son horaire au panneau le plus péjorant pour le débit, le conducteur du second train voit encore néanmoins le feu de voie libre avec une marge de 5 s.

Les résultats des calculs, qu'on trouvera dans le tableau ci-après, montrent l'impact du paramètre  $\chi$ , sur le débit, apparaissant dans les graphiques théoriques de circulation.

Bien entendu, les marges aux panneaux qui ne sont pas les plus péjorants pour le débit, sont en général très supérieures à  $\chi$ , comme l'ont montré des études de simulation. <sup>(1)</sup>

Valeur de $\chi$ en secondes	Composition de la batterie, la même pour tous les cas	Débit horaire (2)				Module (durée de la batterie)
		Banlieue	Grandes lignes	Messageries	Total	
55	$Z_0, Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$	21,7	9,3	3,1	34,1	19 mn 21 s
45	$D_4 - D_3$	23,1	9,9	3,3	36,3	18 mn 10 s
35	3 trains de Grandes Lignes	24,3	10,4	3,5	38,2	17 mn 16 s
25	1 train de Messageries	25,8	11	3,6	40,4	16 mn 20 s
15		26,4	11,3	3,8	41,5	15 mn 53 s
5		28,1	12	4	44,1	14 mn 53 s

Les résultats montrent que le débit croît notablement avec la précision des marches c'est-à-dire avec les  $\chi$  décroissants.

Le respect de l'horaire est une notion classique en exploitation ferroviaire mais si "faire l'heure" à l'arrivée dans une gare est habituel, obtenir des conducteurs, pour un type de train donné, des marches identiques tout le long du parcours, est plus délicat.

Une marge de 25 secondes ne peut donc être considérée comme opérationnelle que grâce à la mise en oeuvre d'automatismes (marche programmée). Il n'est d'ailleurs pas impensable que l'expérience et les progrès en automatique permettent d'espérer des précisions de marches encore plus fines et, à la limite avec  $\chi = 5$  secondes, on atteindrait 44 trains à l'heure c'est-à-dire la plage de saturation des installations terminales.

### 3.32 - Incidence des temps de stationnement

Dans le même esprit, il est intéressant de se rendre compte de l'impact sur le débit des temps de stationnement attribués aux gares lors de l'établissement des graphiques de circulation.

A titre d'exemple, le débit horaire présenté dans le tableau du paragraphe 3.31 qui était de 40,4 trains (dont 25,8 trains de banlieue) avec une marge  $\chi$  de 25 secondes, décroît et devient égal à 39,1 (dont 24,9 trains de banlieue) si le temps de stationnement dans deux gares (Vitry et Ivry) seulement, est choisi à 90 secondes au lieu de 60 secondes.

(1) Voir article relatif à la "Simulation des circulations ferroviaires par ordinateur" publié dans la RCCF de mai 1969

(2) La durée du module de la batterie n'étant pas un sous-multiple de 60 minutes, le nombre n'est évidemment pas un entier.

Sur le plan opérationnel, il est important de noter, conformément aux formules 3 et 4, que les débits sont fonction non seulement des temps de stationnement dans les gares, mais également des temps de ralentissement et d'accélération propres aux trains de banlieue qui doivent être aussi faibles que possible et de valeurs homogènes.

En conclusion, les graphiques à sillons serrés élaborés automatiquement permettent d'accroître notablement le trafic de banlieue et de grandes lignes avec des infrastructures très peu modifiées (pratiquement les infrastructures existantes), les marches devant être respectées, toutefois, avec une certaine rigueur en tout point de la ligne, de manière à assurer une circulation à "la voie libre", avec une marge convenable. Les durées de décélération et d'accélération avant et après les arrêts respectivement doivent être aussi faibles et homogènes que possible.

Pour éviter toute perte de temps dans les stationnements, l'arrêt précis dans les gares est souhaitable pour faciliter les mouvements de voyageurs (arrêt au but).

En cas d'amorce de perturbation, les trains de banlieue doivent pouvoir rattraper leur retard au mieux de leur possibilité et, enfin, les conducteurs des trains de grandes lignes doivent pouvoir recevoir des informations leur permettant d'insérer les mouvements dans une grille de circulations denses aux abords de Juvisy, pendant la période de pointe de banlieue, selon les désirs de la régulation.

Bien entendu, la signalisation doit être conforme aux hypothèses générales qui ont servi de bases aux calculs : des PRS permettant l'établissement rapide des itinéraires et un BAL adapté à ces forts débits.

Enfin, le poste central de régulation doit être informé d'une manière précise de la situation des circulations au temps réel et d'une manière prévisionnelle pour rendre rapidement des décisions en vue de réduire dès que possible les conséquences d'une perturbation.

Le programme étant ainsi fixé, on va énumérer les moyens d'essence cybernétique en cours d'expérimentation pour rendre opérationnels de tels graphiques à sillons serrés (1).

#### 4 - MOYENS CYBERNETIQUES pour RENDRE OPERATIONNELS les GRAPHIQUES à SILLONS SERRÉS afin d'ACCROITRE le DEBIT des INFRASTRUCTURES EXISTANTES.

Pour respecter le programme ainsi défini, il convient d'utiliser des moyens cybernétiques, c'est-à-dire des moyens techniques relevant de l'automatique et de l'informatique, travaillant en temps réel, permettant des prises de décisions automatiques ou manuelles de façon que le système global d'exploitation reste stable et réalise les buts fixés en régime opérationnel.

(1) Bien entendu, des communications ultérieures donneront des informations sur les conceptions de ces moyens et les résultats des essais en cours.

Pour des raisons économiques, l'ensemble de la circulation des trains n'est pas commandée par un seul organe central mais par un ensemble de sous-systèmes judicieusement articulés et inter-agissants entre eux en vue de répondre aux objectifs de débit maximal et de régularité optimale sur les infrastructures existantes.

Trois sous-systèmes sont envisagés :

- Sous-système "infrastructure - signalisation"
- Sous-système "commande traction décentralisée des trains de banlieue"
- Sous-système "régulation et fluidification des circulations".

#### 4.1 - Sous-système : "infrastructure - signalisation"

Il s'agit essentiellement d'un nouveau découpage du BAL, modifiant 30 à 40 % des BAL de Paris à Brétigny (panneaux déplacés, modifiés ou créés), de la création de PRS à Juvisy et Choisy (ce dernier pouvant ou non être rattaché au PRS d'Austerlitz) et enfin de l'installation d'une chronométrie réalisant une synchronisation des horloges de gares.

Ces dispositions sont classiques mais le cas échéant la technologie utilisée pourrait faire appel à des solutions modernes, en particulier, pour les télécommandes à des circuits intégrés.

#### 4.2 - Sous-système : "commande traction décentralisée des trains de banlieue"

Le programme précité impose aux trains les contraintes suivantes :

- respect de la marche à  $\pm 10$  secondes.
- possibilité de rattrapage des retards de quelques dizaines de secondes pris éventuellement lors des arrêts
- arrêts et démarrages automatiques
- arrêts au but précis.

Les études déjà faites en cette matière par la Division des Etudes de Traction Electrique et la Division des Essais de Matériel ont permis de commander rapidement et d'expérimenter des automatismes répondant à ce programme : trois automotrices Z 5 300 de la Région du Sud-Ouest ont été équipées pour permettre, en régime normal, une conduite précise en marche programmée (avec, également, une consommation minimale d'énergie)<sup>(1)</sup>. D'ores et déjà, il apparaît que les automatismes expérimentés donnent des résultats satisfaisants.

(1) Comme déjà précisé, une communication sera faite sous peu à ce sujet et donnera les résultats des essais.

Les trains de grandes lignes peuvent être aussi équipés d'un dispositif simple leur permettant de contrôler leur marche avec une précision égale à celle des automotrices de banlieue ( $\pm 10$  secondes). Pour 85 % <sup>(1)</sup> d'entre eux l'insertion correcte (horaires, vitesse) dans la grille de circulations très denses au niveau de Juvisy sera aisément assurée par ce moyen. Ce dispositif indique au conducteur, dès la gare des Aubrais, son écart (avance ou retard) par rapport à son horaire théorique. Il comporte essentiellement une horloge électronique et un disque codé porteur de l'horaire théorique, ce dernier positionné par un capteur d'espace parcouru, à raison d'une position tous les 5 km. A chaque position un système comparateur calcule l'écart entre les heures, minutes et secondes portées par le disque et l'horloge et l'affiche au mécanicien sous forme numérique.

#### 4.3 - Sous-système : "régulation et fluidification des circulations"

Le régulateur aura à gérer un réseau exploité avec une forte densité de circulation pendant la période de pointe (de l'ordre de 40 trains par heure) ; il convient de lui donner des informations et des moyens de communication pour contrôler son trafic et prendre des décisions.

Les problèmes suivants se posent au centre de régulation :

- connaître rapidement une amorce de perturbations,
- prendre des décisions pour l'insertion de trains de grandes lignes au niveau de Juvisy en fonction d'une situation quelconque,
- prendre des décisions de fluidification pour éviter un arrêt d'un train de banlieue en cas de désheurement à la convergence des voies paires sur la voie d'entrée dans la gare souterraine de Paris-Austerlitz.

Ce système bouclé a quatre niveaux de fonction :

- Niveau 1 : prise de l'information et exécution des décisions
- Niveau 2 : traitement des informations
- Niveau 3 : supervision du régulateur, prise et contrôle de décisions
- Niveau 4 : aide à l'exécution des décisions : élaboration et emmagasinage dans un programme des suites d'ordres destinés aux PRS et trains.

Les moyens suivants sont à disposition pour réaliser ces fonctions :

- pour le niveau 1 : des capteurs d'informations donnant l'identification des trains et leur position, des installations de signalisation : postes et signaux classiques ou nouveaux (panneaux ou jalons de fluidification, PRS à grands itinéraires).

(1) En effet, les mesures effectuées ont indiqué que 85 % des trains étaient, à quelques minutes près, à l'heure à Etampes, ce qui montre que des informations précises d'horaires fournies au conducteur dès Les Aubrais lui permettront de présenter son train avec une bonne précision et à vitesse normale à Juvisy et de régler judicieusement sa marche.

- pour le niveau 2 : un calculateur pour collecter les informations, en effectuer le traitement, présenter au régulateur le graphique actuel des trains et projeter la situation future en signalant éventuellement les conflits compte tenu des contraintes de circulation.
- pour le niveau 3 : un visualisateur qui permet à l'homme de dialoguer facilement avec le calculateur et par là avec le système, en vue de contrôler des décisions et éventuellement d'en prendre de meilleures en fonction des conditions du moment.
- pour le niveau 4 : des mémoires qui, associées à des moyens de transmissions, emmagasinent l'ordonnancement des itinéraires à transmettre aux postes et les informations de régulation à transmettre aux mobiles, pour un intervalle temps de l'ordre du quart d'heure.

La plupart de ces moyens font appel à des techniques conventionnelles et seuls ceux du niveau 3 vont être décrits.

Le Service de la Recherche de la SNCF avec la collaboration de la CII et de la CITEC,<sup>(1)</sup> a expérimenté un système calculateur-visualisateur existant afin de rechercher le plus économiquement possible si un tel système pouvait répondre aux besoins et objectifs précités pour une régulation automatique du trafic. Les études et l'expérimentation ont été effectuées sur le calculateur associé à un visualisateur du laboratoire de physique nucléaire du Collège de France qui a pu être mis à la disposition de l'équipe SNCF - CII et CITEC (voir la figure en annexe 3)<sup>(2)</sup>. Ce système a été présenté en visualisation trichrome au Sicob d'octobre 1969. (stand CITEC - console de visualisation CGE).

Le calculateur utilisé, du type CAE 90.10 a les caractéristiques suivantes : circuits intégrés, mots de 12 bits (+ 1 de parité), cycle de mémoire de 1,75  $\mu$ s, mémoire de 32 000 mots, temps réel et programmation en langage machine.

Les périphériques classiques employés sont : un lecteur de cartes rapide, un lecteur perforateur de ruban, un dérouleur de bandes magnétiques, une imprimante et une machine à écrire.

La console de visualisation a les caractéristiques suivantes : type graphique, 1 000 lignes adressables à 1 000 points par ligne, pas de mémoire tampon, génération des vecteurs (fins - épais) et de caractères (3 dimensions), photostyle de dialogue et horloge interne pour demande de rafraîchissement de l'image (toutes les 33 secondes).

Le calculateur fournit au visualisateur les informations pour tracer les graphiques des trains sous la forme espace-temps (voir figure en annexe 4) pour une durée de 20 mn en distinguant de part et d'autre du temps  $T_0$  le passé et le futur sur des périodes respectivement de 5 et 15 mn. Le calculateur peut donner la prévision du trafic à partir d'un programme "chaix" établi à partir de tables de marches théoriques introduites une fois pour toutes dans l'ordinateur et qui ont été élaborées à partir des marches introduites dans le programmeur de conduite automatique des automotrices Z 5 300 ou des fascicules horaires suivis par les conducteurs des locomotives de grandes lignes.

(1) CII - Compagnie Internationale pour l'Informatique  
CITEC - Compagnie Internationale pour les Techniques Electroniques de Contrôle

(2) Une information à ce sujet a déjà été donnée dans la RGCF de février 1969 page 110.



Le régulateur est avisé d'un conflit possible dans le futur immédiat, c'est-à-dire lorsque l'écart dans le temps entre les marches de deux trains devient inférieur à une valeur limite (de 30 s à 2 mn suivant les conditions locales) qui caractérise le fait que le train suivant risque de rencontrer une signalisation lui imposant un ralentissement ou même un arrêt. Le conflit est signalé au régulateur dans la partie extrapolée par un cercle lumineux clignotant entourant le point où le conflit se produirait ; dans une phase ultérieure le calculateur proposera une solution pour éviter ce conflit en fonction de règles programmées à partir de données empiriques et mathématiques ou, éventuellement, grâce à un simulateur câblé imaginé par le Dr SAUVAN, construit par la SNECMA, à base de "Mémoire Active", qui peut résoudre en temps réel des problèmes combinatoires en donnant une solution optimale. Ce simulateur est en cours de construction.

Le régulateur reste, de toute manière, maître de la situation, car il contrôle le système et éventuellement impose une autre solution.

Le dialogue entre le régulateur et le visualisateur se fait actuellement d'une manière simple en utilisant un photostyle : la présentation de ce crayon lumineux sur des points du graphique donne en clair sur l'écran le numéro du train considéré, permet de modifier la marche de celui-ci et de visualiser l'effet en résultat, de délimiter le graphique partiel d'une zone déterminée, etc. Dans le futur, d'autres moyens opérationnels peuvent être envisagés, par exemple, un pupitre de dialogue.

Bien entendu, si le besoin le justifie, il est possible de disposer en temps réel, soit de tableaux horaires fournis par une imprimante, soit de graphiques tracés automatiquement, pour des contrôles ou études a posteriori, en utilisant des enregistrements sur bande magnétique.

## CONCLUSION

Après quelques considérations générales sur le débit des lignes équipées de BAL, on a montré qu'il était possible, dans une exploitation par batteries, de déterminer automatiquement des graphiques à sillons serrés conférant une certaine optimisation de la capacité d'une ligne et de dégager les paramètres fondamentaux concernant la précision des marches, les caractéristiques d'arrêt et de démarrage des engins, l'influence des durées de stationnements et la nécessité de disposer d'installations très automatisées à délai de réponse rapide. Pour être opérationnelles, de telles grilles à sillons serrés qui permettent d'augmenter de l'ordre de 30 % le débit global sur les infrastructures existantes, nécessitent des automatismes dans les domaines de la signalisation, de la traction et de la régulation. Les expérimentations, en

cours, des marches programmées, montrent que les automatismes permettent aux automotrices de banlieue, non seulement de respecter les horaires et d'assurer une circulation à la voie libre, mais, également, de rattraper les retards et, en régime normal d'économiser de l'énergie. La régulation doit disposer d'un calculateur qui traite des informations et permette de prendre des décisions pour rétablir le plus vite possible le régime normal et de fluidifier les trains aux abords de Juvisy et de l'entrée en gare souterraine de Paris-Austerlitz. Le dialogue nécessaire régulateur-système est rendu aisé et souple par un visualisateur et par des communications possibles avec les conducteurs soit par radio soit par signaux de régulation (en cours d'expérimentation).

## CALCUL DE L'INTERVALLE SEPARANT DEUX TRAINS SUCCESSIFS

On considèrera d'abord pour une ligne non dotée de préavertissements, le cas où les trains en succession n'ont pas d'arrêt sur le tronçon considéré puis, le cas où il y a un ou des arrêts. Ensuite, la formulation sera étendue au cas d'une ligne avec préavertissement.

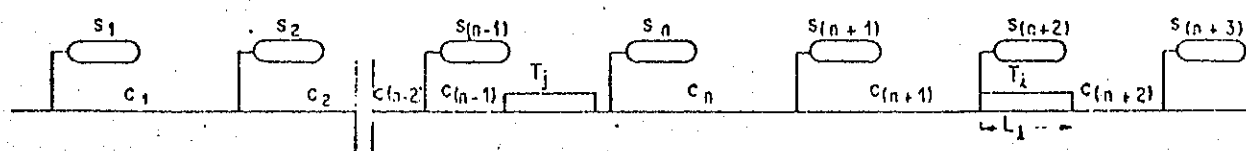


Figure 1 : Représentation générale de deux trains  $T_i$  et  $T_j$  en circulation en succession sur une ligne équipée de block automatique.

La tête du premier train  $T_i$  aborde le canton  $C_{(n+2)}$  à l'heure

$$H_{i(n+2)} = \sum_{k=1}^{k=n+1} \frac{C_k}{V_{ik}}$$

si  $V_{ik}$  est la vitesse moyenne de circulation du train  $i$  sur le canton  $k$ .

Le signal  $S_n$  passe au vert à l'heure  $H_{i(n+1)}^d$  où la queue du train dégage le canton  $(n+1)$ , soit :

$$H_{i(n+1)}^d = \sum_{k=1}^{k=n+1} \frac{C_k}{V_{ik}} + \frac{L_i}{V_{i(n+1)}^d}$$

si  $L_i$  est la longueur du train  $i$  et  $V_{i(n+1)}^d$  la vitesse moyenne de dégagement du canton  $(n+1)$ .

Le deuxième train part au temps  $\Theta_{jn}^i$  et aborde le signal  $S_n$  à l'heure  $H_{jn}$  telle que :

$$H_{jn} = \Theta_{jn}^i + \sum_{k=1}^{k=n-1} \frac{C_k}{V_{jk}}$$

Pour que le train  $T_j$  aborde le signal  $S_n$   $x$  secondes au minimum après le passage au vert de celui-ci, il faut :

$$H_{jn} \geq H_{i(n+1)}^d + x$$

ou :

$$\theta_{jn}^i \geq x + \frac{L_i}{V_{i(n+1)}^d} + \sum_{k=1}^{k=n+1} \frac{C_k}{V_{jk}} - \sum_{k=1}^{k=n-1} \frac{C_k}{V_{jk}}$$

Si on désigne par  $t_{ik}$  et  $t_{jk}$  respectivement le temps mis par les trains  $T_i$  et  $T_j$  pour parcourir les cantons de rang  $k$  (ce qui est facilement obtenu à partir des marches calculées par les services de la Traction) l'intervalle  $\theta_{jn}^i$  est alors donné par :

$$\theta_{jn}^i \geq x + t_{i(n+1)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+1} t_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} t_{jk} \quad (1)$$

en désignant par  $t_{i(n+1)}^d$  le temps de dégagement du canton  $(n+1)$  par le train  $T_i$ .

Le calcul est effectué pour chaque panneau  $S_n$  de la ligne et comme précisé ci-dessus pour les développements ultérieurs, la limite supérieure sera seule prise en considération (c'est le panneau dit plus "péjorant").

S'il y a un arrêt, il convient sur le canton  $n$  considéré de majorer le temps de parcours du train  $T_i$ , d'une quantité  $a'_{in}$  tenant compte de la durée de stationnement  $a_{in}$  et des temps de ralentissement  $r_{in}$  et d'accélération  $\gamma_{in}$  ( $a'_{in} = r_{in} + a_{in} + \gamma_{in}$ ) comme le montre la figure 2.

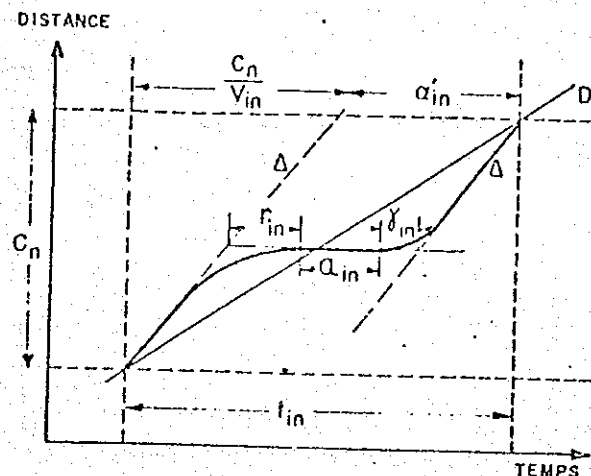


Figure 2

Figure 2 - Détermination du temps  $a'_{in}$  correspondant à un arrêt dans le canton  $n$  où un stationnement est envisagé.

La formule (1) devient alors pour des circulations avec arrêts :

$$\theta_{j,n}^i \geq \chi + t_{i(n+1)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+1} t_{ik} + a'_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} t_{jk} + a'_{jk} \quad (2)$$

$$\theta_{j,n}^i \text{ (avec arrêts)} = \theta_{j,n}^i \text{ (sans arrêts)} + \sum_{k=1}^{k=n+1} a'_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} a'_{jk} \quad (3)$$

On voit tout l'intérêt de minimiser l'expression :

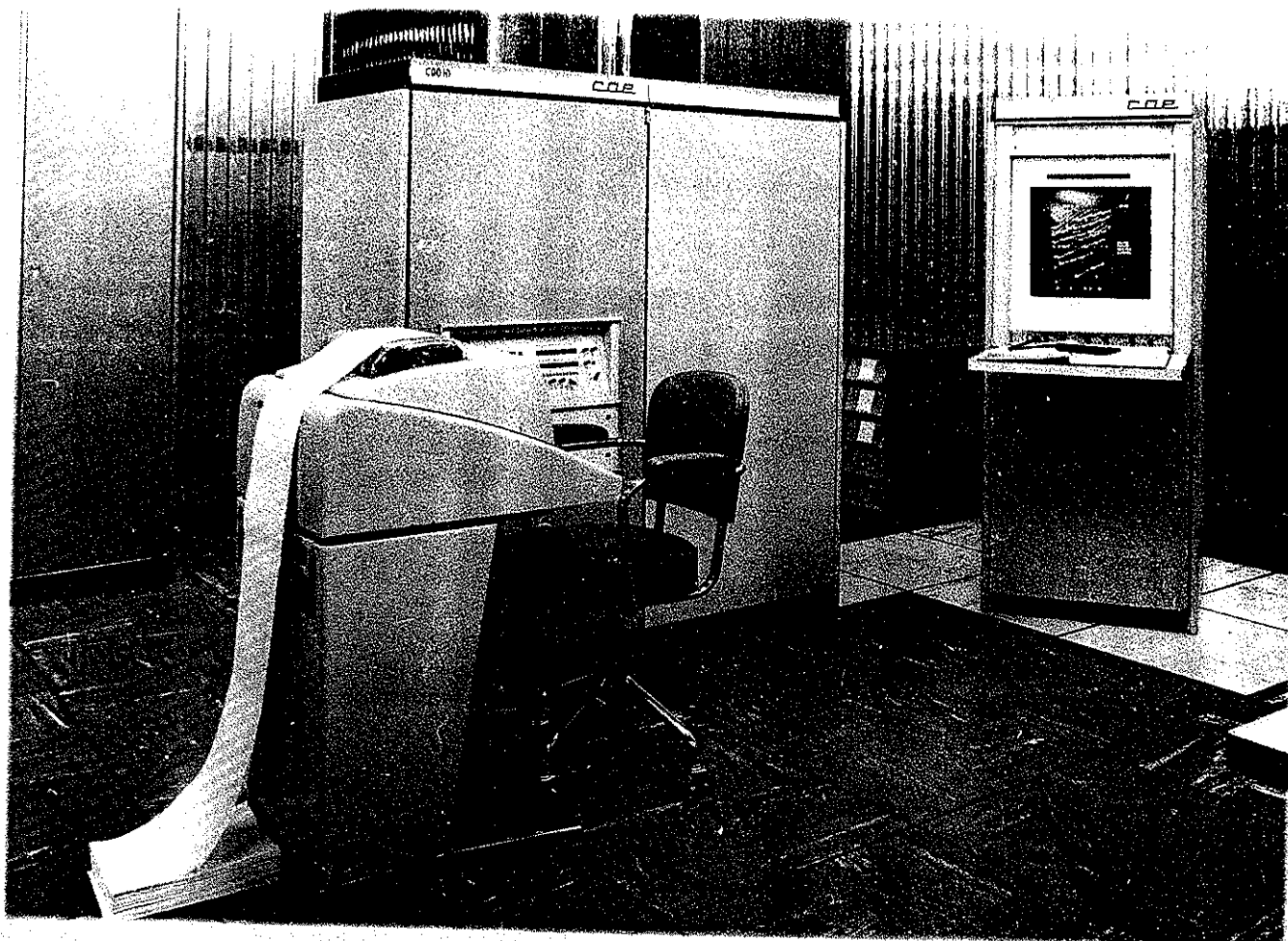
$$\sum_{k=1}^{k=n+1} a'_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} a'_{jk}$$

c'est-à-dire d'avoir pour les trains en succession, d'une part, des durées de stationnement aussi identiques que possible et, d'autre part, comme les temps  $a'$  sont directement liés aux caractéristiques de freinage et de démarrage, à disposer de valeurs aussi homogènes que possible pour des trains à marches identiques et des taux d'accélération et de décélération aussi grands que possible pour que ces termes  $a'$  soient faibles.

Les formules (1) et (2) sont facilement extensibles au cas d'une ligne avec des préavertissements. Il convient, pour conserver le critère de circulation à la voie libre avec une marge  $\chi$ , d'augmenter d'un canton l'espacement entre les trains et l'on a :

$$\theta_{j,n}^i \geq \chi + t_{i(n+2)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+2} t_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} t_{jk} \quad (1')$$

$$\theta_{j,n}^i \geq \chi + t_{i(n+2)}^d + \sum_{k=1}^{k=n+2} t_{ik} + a'_{ik} - \sum_{k=1}^{k=n-1} t_{jk} + a'_{jk} \quad (2')$$



### CENTRE EXPÉRIMENTAL DE RÉGULATION

- calculateur
- visualisateur donnant le graphique des trains
- pupitre d'introduction des données

