



**HAL**  
open science

# Contribution à la commande en temps réel du trafic urbain avec modèle en ligne

Robert Rumeau

► **To cite this version:**

Robert Rumeau. Contribution à la commande en temps réel du trafic urbain avec modèle en ligne. Automatique / Robotique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1974. Français. NNT: . tel-00176577

**HAL Id: tel-00176577**

**<https://theses.hal.science/tel-00176577>**

Submitted on 4 Oct 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ PAUL SABATIER DE TOULOUSE

en vue de l'obtention

du titre de DOCTEUR-INGÉNIEUR

par

**Robert RUMEAU**

Ingénieur ENSM

---

## CONTRIBUTION A LA COMMANDE EN TEMPS RÉEL DU TRAFIC URBAIN AVEC MODÈLE EN LIGNE

---

Soutenue le 30 Mai 1974 devant la Commission d'Examen :

MM. J. LAGASSE

Président

Y. SEVELY

P. TURPIN

J.-J. HENRY

A. GIRAUD

} Examineurs

## AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Laboratoire d'Automatique et d'Analyse des Systèmes du Centre National de la Recherche Scientifique, dirigé par Monsieur le Professeur LAGASSE. Nous tenons à lui exprimer toute notre gratitude pour nous avoir accepté dans son laboratoire. Nous lui sommes particulièrement reconnaissant pour le grand honneur qu'il nous fait en acceptant de présider notre jury de thèse.

Nous remercions très vivement Monsieur le Professeur SEVELY de l'Université Paul Sabatier pour avoir bien voulu accepter de siéger à notre commission d'examen.

Nous adressons nos remerciements à Monsieur CSECH, directeur général de la Compagnie Générale d'Automatisme, pour avoir accepté de participer à notre jury de thèse.

Nous sommes particulièrement sensible au fait que Monsieur HENRY, Responsable d'Equipe au D.E.R.A./C.E.R.T., ait bien voulu marquer de sa compétence notre jury de thèse.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à Monsieur GIRAUD chargé de Recherche au Centre National de la Recherche Scientifique, qui a été à l'origine de ces travaux. Ses conseils avisés, ses encouragements, nous ont permis d'améliorer la qualité de notre travail et de mener à bien cette étude.

Messieurs AUTHIE et FONTAN ainsi que tous les autres membres de l'équipe trafic. Messieurs DOMENECH, JOLLE, JULVE, SAGLIER trouveront ici l'expression de notre gratitude pour le soutien qu'ils nous ont apporté tout au long de nos travaux.

Nous nous devons de remercier Monsieur le Professeur BASANEZ,  
Directeur du Laboratoire d'Automatique de l'Université Polytechnique de  
Barcelone, pour nous avoir facilité les dernières mises au point de ce travail.

Enfin, nous ne saurions oublier de remercier le Service de  
Documentation et toutes les personnes anonymes qui ont contribué à la réalisa-  
tion matérielle de ce mémoire.

---

PLAN DU MEMOIRE

INTRODUCTION

PREMIERE PARTIE

PROBLEMES POSES PAR L'APPLICATION EN TEMPS REEL  
D'UNE COMMANDE DES FEUX DE TRAFIC AGISSANT SUR  
LE CYCLE, LE SPLIT, ET LES DECALAGES.

- I. - Rappel de quelques définitions
- II. - Choix d'un cycle et problème du découpage en zones.
  - Introduction
  - Découpe d'un réseau en zones
  - Programme de découpe
  - Calcul de la valeur du cycle
- III. - Etablissement d'un plan de coordination
  - III.1. - Le modèle
    - Introduction
    - Présentation du modèle L.A.A.S.
    - Mode d'utilisation - performances
  - III.2. - Optimisation des décalages d'un réseau Maillé
    - Formulation générale du problème
    - Influence du modèle sur la méthode d'optimisation
    - Présentation de la méthode séquentielle (M.S.)
    - Modification de cette méthode
  - III.3. - Détermination de la Base de commande à partir du réseau et de la configuration de trafic
    - Influence des couplages sur les performances de la M.S.
    - Notion de "Bloc de Trafic"
    - Etude des couplages dûs à la constitution des blocs
    - Validation du critère de couplage
    - Détermination de la base optimale par l'algorithme énumératif de J.P. Char
    - Dégradation du critère pour l'application de l'algorithme direct de Kruskal
    - Influence de l'ordre de traitement des blocs de trafic
    - Utilisation de la méthode séquentielle avec le modèle Transyt

DEUXIEME PARTIE

CONCEPTION, ETUDE ET MISE EN PLACE SUR UN  
PETIT CALCULATEUR D'UNE COMMANDE PREDICTIVE  
ET ADAPTATIVE DES FEUX DE TRAFIC D'UNE ZONE  
URBAINE.

INTRODUCTION

- I. - Aspect prédictif de la commande par commutation du vert
- II. - La prédiction du Trafic
  - Organisation de l'acquisition de l'information
  - Le modèle de prédiction du Trafic :
    - . 1ère hypothèse
    - . 2ème hypothèse
- III. - La prédiction de l'état des feux
  - Problème
  - Hypothèse - Solution retenue
  - Gestion de la table d'état des feux
- IV. - Les modèles de décision
  - Organisation de la rotation adaptative des feux
  - Les différents modèles de décision
    - . Régimes fluides
    - . Régimes saturés
    - . Régimes de transition
    - . Inclusion de véhicules prioritaires
- V. - Réalisation pratique d'un modèle de décision en régime fluide
  - Organisation des travaux sur le calculateur
  - Le programme de décision :
    - a) - Construction de l'environnement
    - b) - Prédiction du Trafic et des feux
    - c) - Recherche de la meilleure politique
- VI. - Etude comparative du comportement de l'algorithme
  - Conditions de la mesure
  - Choix de l'étalon de référence
  - Choix des configurations de trafic
  - Etude du carrefour isolé
  - Etude de deux carrefours adaptatifs en ligne
  - Etude de l'artère adaptative
- VII. - Conclusions sur la mesure d'efficacité de la commande adaptative et perspectives d'une commande conciliant macro et microrégulations.

CONCLUSION GENERALE

ANNEXE

Description d'une chaine d'acquisition semi-automatique permettant l'analyse d'une situation réelle de trafic.

---





## INTRODUCTION

Du fait de l'accroissement régulier du nombre de véhicules, les transports routiers connaissent un développement spectaculaire depuis de nombreuses années à tel point que, pour pallier partiellement aux insuffisances des infrastructures, les responsables de la circulation ont, de plus en plus, tendance à faire appel à l'électronique et aux automatismes.

Les réseaux urbains ont, les premiers, été menacés par la congestion et, c'est donc dans les grandes villes que les premières réalisations ont vu le jour. Plusieurs pays tels l'Angleterre, les Etats-Unis, le Japon, l'Espagne et la France possèdent déjà des installations de contrôle centralisé. Cependant, la plupart de ces installations fonctionnent sur la base de programmes fixes préétablis que l'on sélectionne en fonction de mesures faites sur le trafic.

De nos jours, le perfectionnement incessant des calculateurs électroniques a mis à notre disposition de puissants organes de mesure et de commande en temps réel et a convaincu de nombreuses personnes du fait que la solution se trouvait dans l'utilisation judicieuse de ce type de matériel. Restait à concevoir une philosophie moderne de la commande des feux capable d'utiliser au mieux les possibilités offertes.

Le travail que nous présentons dans ce mémoire est une contribution à la définition de ces nouvelles stratégies de commande.

### PREMIERE PARTIE

Dans la première partie, nous nous sommes attachés à mettre au point une action en temps réel sur les feux, tout en conservant la structure classique de commande : le cycle, le partage de ce cycle en vert et rouge et les décalages temporels entre les différentes phases. L'obtention en temps réel d'un plan de coordination étant un problème théorique délicat, nous présentons en détail la façon dont nous

I'avons abordé puis nous proposons une méthode d'optimisation des décalages valable pour un réseau maillé quelconque.

Cependant, malgré tous nos efforts, ce type de commande ne peut s'affranchir d'une certaine constante de temps de réponse et de certaines insuffisances. De ce fait, nous nous sommes tournés vers un style nouveau de commande que nous présentons dans la deuxième partie.

## DEUXIEME PARTIE

Prédiction du Trafic et fractionnement de la décision dans le temps et dans l'espace de façon à mieux s'adapter aux fluctuations locales de l'écoulement, tels ont été les objectifs que nous avons poursuivis, donnant ainsi le jour à une nouvelle méthode de régulation du trafic, fort prometteuse pour le traitement des transitoires, des régimes saturés et pour la prise en compte des transports en commun. Un algorithme spécifique aux régimes fluides a été conçu et, par sa mise en oeuvre effective sur le simulateur hybride, nous avons montré qu'une commande de ce genre est parfaitement réalisable sur un petit ordinateur.

En conclusion de ces travaux, nous ébauchons les grandes lignes d'une commande plus élaborée qui, profitant de nos deux expériences précédentes, concilierait les deux aspects macroscopique et microscopique du trafic urbain.

---

PREMIERE PARTIE

---

PROBLEMES POSES PAR L'APPLICATION EN TEMPS REEL  
D'UNE COMMANDE DES FEUX DE TRAFIC AGISSANT  
SUR LE CYCLE, LE SPLIT, ET LES DECALAGES.

---



## CHAPITRE I

### RAPPEL DE QUELQUES DEFINITIONS

Aux alentours des années 1920 apparut aux carrefours des grandes villes un matériel permettant d'orchestrer les conflits entre véhicules. Ces premiers feux de trafic allaient donner le jour à une terminologie particulière : nous allons rappeler quelques définitions.

**PHASE** : C'est l'état de fonctionnement du carrefour pendant lequel certains flux de trafic sont autorisés. Tout changement de phase se traduit par le basculement d'au moins un feu.

**CYCLE** : Il est constitué par l'enchaînement des phases. Sa durée est égale au temps qui sépare deux évènements homologues et consécutifs d'une même phase.

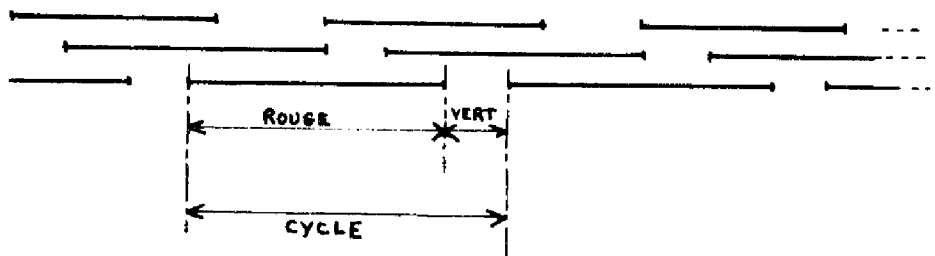


Figure 1 - Définition du cycle

**SPLIT** : Le split d'un carrefour (ou partage) est un ensemble de  $n$  fractions

$$\frac{v_i}{c}, i = 1, n \quad \text{où :}$$

$n$  est le nombre de phases du carrefour

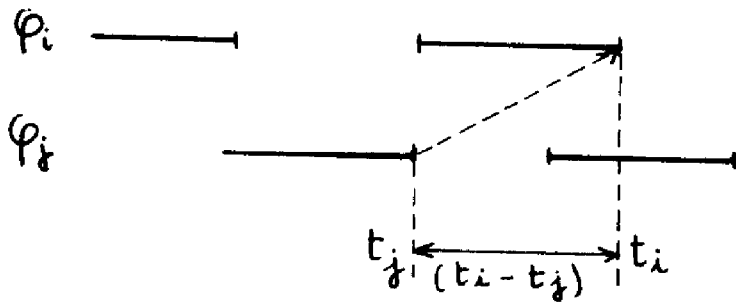
$c$  est la durée du cycle

$v_i$  est la durée du vert de la phase  $i$

Le split caractérise la répartition de l'offre entre les diverses demandes.

DECALAGE - (Offset) : Le décalage est le temps qui sépare les débuts de vert de deux phases voisines.

Si ces dernières appartiennent à deux carrefours ayant des cycles constants



égaux, le décalage est constant et s'exprime modulo le cycle.

L'ensemble des décalages constitue alors le plan de coordination dudit réseau.

Figure 2 - Définition du décalage

Dans un plan de coordination, tous les décalages peuvent être exprimés : soit par rapport à une phase de référence fictive ou réelle ; on parle alors de décalages absolus par rapport à cette phase, soit par un ensemble de décalages entre phases voisines ; on parle alors de décalages relatifs.

Pour un réseau maillé possédant  $n$  noeuds, le plan de coordination est entièrement défini par  $(n-1)$  décalages qui forment alors une base. Tous les autres décalages se déduisent de la base par les relations de maille.

COMMANDE CLASSIQUE - Dans ce que nous conviendrons d'appeler "commande classique", les paramètres : cycle, split et décalages sont pris pour variables d'action.

Nous allons présenter les principaux problèmes que soulèvent ces différentes optimisations partielles.

----

## CHAPITRE II

### CHOIX D'UN CYCLE ET PROBLEME DU DECOUPAGE

#### EN ZONES

##### INTRODUCTION

La commande classique, précédemment définie, essaye de gérer l'écoulement du trafic à l'intérieur d'un réseau en imposant, entr'autres, un plan de coordination : mais un tel plan ne devient un invariant et n'a donc de sens que si on lui adjoint un cycle de reproduction. Tous les décalages d'un certain sous-ensemble du réseau (que nous appellerons zone) s'exprimeront alors modulo ce cycle commun. On voit donc surgir deux problèmes :

- Comment découper un réseau en sous ensembles homogènes pouvant constituer des zones ?
- Comment calculer la valeur du cycle de chaque zone ?

Nous allons essayer d'apporter une réponse à chacune de ces questions.

##### II.1. - Découpe d'un réseau en zones

La méthode que nous allons présenter et qui permet de découper un réseau quelconque en différentes zones, si elle est, à notre connaissance, originale, est cependant purement empirique car basée sur une définition intuitive de la notion de "voisinage" (au sens trafic) entre deux chainons. Elle a néanmoins donné des résultats corrects sur tous les réseaux auxquels nous l'avons appliquée.

Sa programmation sur un ordinateur est très simple (voir listings) mais le temps de calcul peut devenir important pour de très grands réseaux.

Dans tous les cas, sa mise en oeuvre doit commencer par une description détaillée du réseau et du trafic qui le parcourt.

### II.1.a) - Description du réseau et du trafic interne.

Cette description se fait tronçon par tronçon. Pour chacun, nous indiquons : son numéro, le débit injecté de l'extérieur, le numéro du tronçon débitant par son va-tout-droit et le pourcentage correspondant, le numéro du tronçon débitant par son tourne-à-droite et le pourcentage correspondant, le numéro du tronçon débitant par son tourne-à-gauche et le pourcentage correspondant. Avec ces données, il est possible par un programme itératif, d'obtenir les débits à l'équilibre dans chacun des tronçons.

Dans la suite du raisonnement, nous travaillerons uniquement avec des chaînons (ensemble de 1 ou 2 tronçons). Le débit dans le chaînon  $i$  sera alors la somme des débits parcourant les tronçons qui le composent.

### II.1.b) - Définition d'une "matrice de voisinage".

Imaginons que, une fois à l'équilibre, le réseau se vide entièrement sauf dans le chaînon  $i$  et recherchons le régime d'équilibre fictif obtenu en écoulant le débit de ce chaînon dans le réseau tout en respectant les anciens pourcentages d'orientation.

Il est ainsi possible de définir la matrice  $v_{ij}$ , ensemble des débits circulant dans le chaînon  $j$  et provenant du chaînon  $i$ . Cette matrice  $v_{ij}$  étant pour nous l'image des liens et couplages entre chaînons, nous l'appellerons "matrice de voisinage" du réseau et des débits considérés.

### II.1.c) - Exemple

Nous donnons ci-dessous un exemple de réseau (fig. 3) pour lequel nous avons effectué la description du trafic (fig. 4) et la construction de la matrice de voisinage (fig. 5).



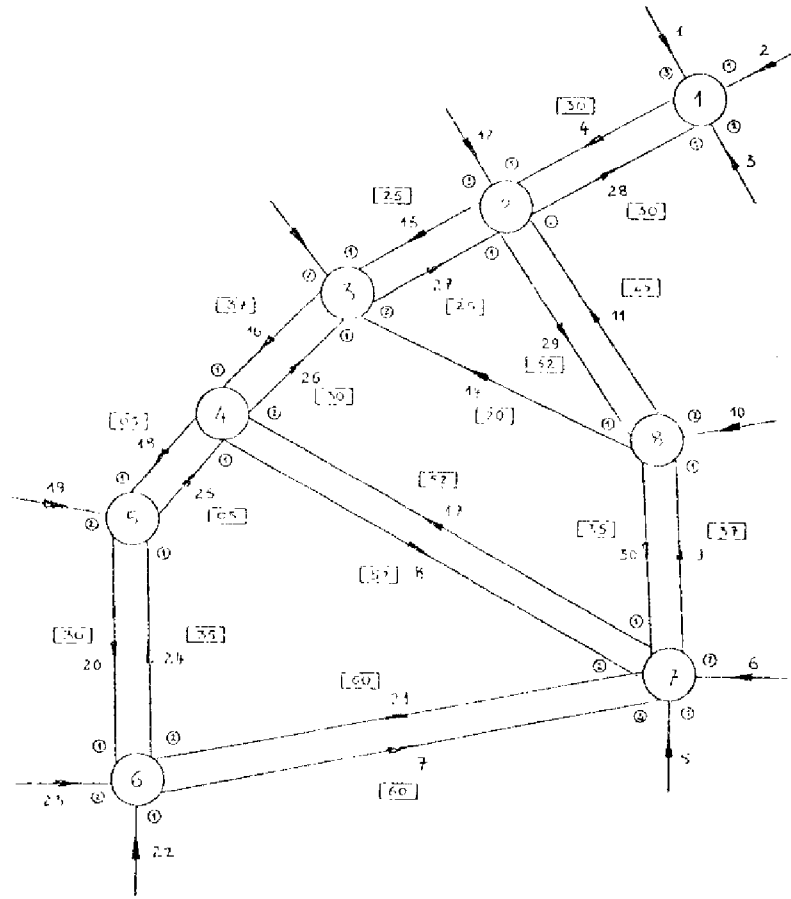


Fig. 3 : Exemple de réseau à découper

1	100	0	0	0	0	0	0	0
2	100	0	0	0	0	0	0	0
3	100	0	0	0	0	0	0	0
4	0	2	75	1	50	3	50	0
5	200	0	0	0	0	0	0	0
6	400	0	0	0	0	0	0	0
7	0	25	25	42	69	20	0	75
8	0	0	0	25	50	16	0	50
9	0	5	50	6	13	7	0	6
10	800	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	75	10	6	0	0	0
12	400	0	0	0	0	0	0	0
13	0	4	50	17	25	11	0	13
14	0	0	61	0	0	0	0	0
15	400	0	0	0	0	0	0	0
16	0	15	50	15	50	14	0	16
17	0	5	61	30	15	0	0	13
18	0	16	50	17	75	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	19	100	0	0	0	0	0
21	0	10	25	5	38	6	0	6
22	400	0	0	0	0	0	0	0
23	200	0	0	0	0	0	0	0
24	0	22	25	21	13	23	0	31
25	0	24	51	0	0	0	0	0
26	0	25	50	17	25	0	0	0
27	0	26	75	14	19	15	0	0
28	0	27	62	11	50	12	0	13
29	0	12	62	27	13	4	0	0
30	0	29	75	10	13	0	0	0

Fig. 4 : Description numérique

525	87	43	21	22	10	7	0	21	23
190	523	108	57	58	41	52	0	57	68
102	161	645	223	226	75	24	0	220	247
45	59	78	784	553	23	33	0	77	502
45	59	78	184	821	28	33	0	77	502
111	34	23	33	35	514	224	0	37	79
90	31	24	44	46	169	552	0	51	111
76	123	124	63	64	16	13	648	63	70
72	108	143	426	429	26	27	0	846	423
21	12	13	24	30	36	47	0	12	1025

Fig. 5 : Matrice des voisinages obtenue

### II.1.d) - Formulation matricielle de la partition d'un réseau.

Nous définirons une partition d'un réseau de  $n$  chaînons en deux sous-ensembles de  $p$  et  $(n - p)$  chaînons par la matrice  $(n \times n)$   $x_{ij}$  telle que :  
 $i$  et  $j$  étant les numéros de deux chaînons :

$$\text{si } i \text{ et } j \in \text{ même zone} \Rightarrow x_{ij} = 0$$

$$\text{si } i \text{ et } j \notin \text{ même zone} \Rightarrow x_{ij} = 1$$

Remarquons que cette matrice  $x_{ij}$  est symétrique, ses termes diagonaux sont nuls, la somme de ses termes vaut  $n(n-p)$ .

### II.1.e) - Evaluation du critère de qualité d'une partition.

Toute partition du réseau en deux zones entraîne inévitablement une perte d'information par rupture de chaînons et découplage du trafic. Nous posons a priori que cette dégradation de la connaissance varie comme la somme des "voisinages" négligés. Le coût de chaque partition sera donc, pour nous, défini par la somme des termes du produit :

$$\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} v_{i, j} \cdot x_{i, j}$$

et nous définirons également un coefficient de couplage.

$$\text{Coefficient de couplage} = \frac{\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, n} v_{i, j} \cdot x_{i, j}}{\sum_{i=1, n} v_{i i}}$$

### II.1.f) - Recherche de la partition à découplage maximum.

$n$  et  $p$  étant fixés, ainsi que la matrice  $v_{i j}$ , il s'agit maintenant de trouver la matrice de partition  $x_{i j}$  minimisant le coût de couplage précédemment défini. N'ayant eu à résoudre ce problème que pour des petits réseaux (jusqu'à 40 chaînons) nous nous sommes contentés de la méthode énumérative que nous proposons ci-dessous. Notons cependant que dans le cas particulier où  $p = n/2$  (partition en deux zones ayant le même nombre de chaînons), le problème prend la forme :

Trouver  $x_{ij}$  telle que :

$$x_{ij} = x_{ji}$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1$$

$$\sum_{i=1, 2, \dots, p} x_{ij} = p$$

$$\sum_{j=1, 2, \dots, p} x_{ij} = p$$

et minimise :

$$\sum_{i=1, 2, \dots, p} \sum_{j=1, 2, \dots, p} x_{ij} \cdot v_{ij}$$

Or, ce problème appartient à la classe des problèmes de la programmation linéaire en variable bivalente (0 ou 1) ( Problème de "Transport". voir référence (7) ). Il est donc soluble par des méthodes plus directes (Branch and Bound) que celle que nous avons retenue.

#### II.1. g) - Présentation rapide de la méthode énumérative

Cette méthode est basée sur une énumération permettant de construire toutes les zones possibles.

Si le réseau contient  $N$  chaîbons et si nous cherchons une partition en  $p$  et  $(N - p)$  chaîbons, nous simulons un compteur de  $N$  bits en associant un chaîbon à chacun des bits. Sont considérés comme appartenant à une même zone tous les chaîbons dont les bits sont à 1. Ainsi, si nous désirons générer toutes les zones possibles contenant  $p$  chaîbons, il suffit d'incrémenter le compteur et, à chaque étape, effectuer la somme de ses bits. Si cette somme vaut  $p$ , on calcule alors le critère de couplage correspondant à cette configuration et nous la mémorisons si c'est la meilleure rencontrée jusqu'à présent.

Cette méthode a l'inconvénient d'envisager  $(p !)$  fois la même zone et donc d'avoir un temps de calcul important mais elle a l'avantage d'être facilement programmable.

Elle pourrait, certes, être accélérée ; cependant, pour des petits réseaux, la version que nous proposons est encore acceptable.

Une remarque s'impose en ce qui concerne la structure des zones obtenues. Lors des partitions que nous avons entreprises, les flux de trafic étaient

tels, que nous avons toujours obtenu deux zones convexes (au sens de la théorie des graphes). Cependant, il n'est pas exclu dans certains cas d'obtenir une zone non convexe. Ceci signifie que le problème de la partition est mal posé et que le réseau doit être décomposé en plus de deux zones.

Ce résultat pourrait par exemple être trouvé dans le réseau suivant :

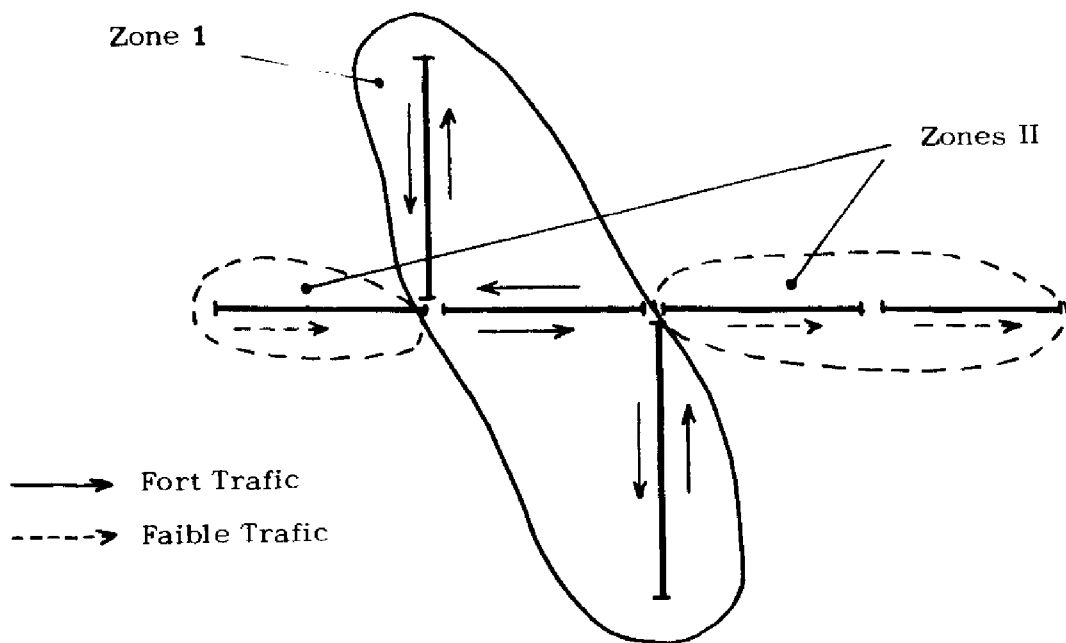


Fig. 6 = Exemple possible de découpe en 3 sous-ensembles.

Nous voyons donc que, par notre méthode, il est également possible d'obtenir une information sur le nombre de zones à considérer.

#### II.1.h) - Quelques résultats

1er cas : Réseau Test (voir fig. 7)

Dans ce cas évident (les flux de trafic sont **d**isjoints), nous trouvons sans difficulté la solution (1-4) avec un coefficient de couplage nul puisque dans ce cas particulier, la partition n'apporte aucune perte d'information.

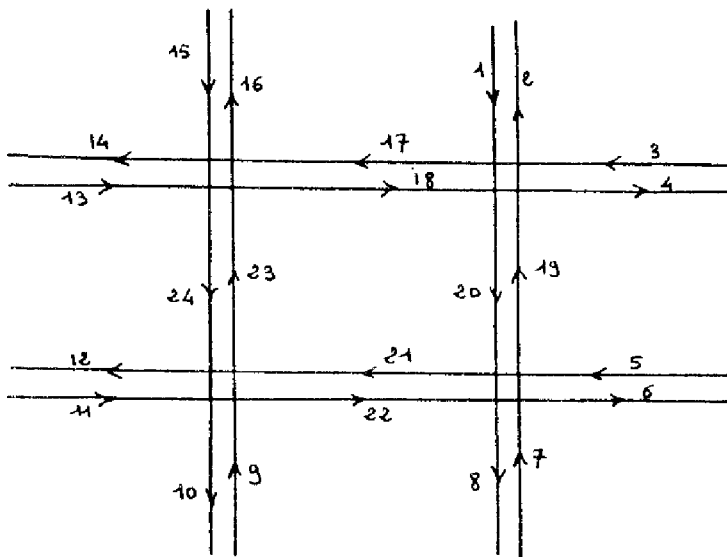
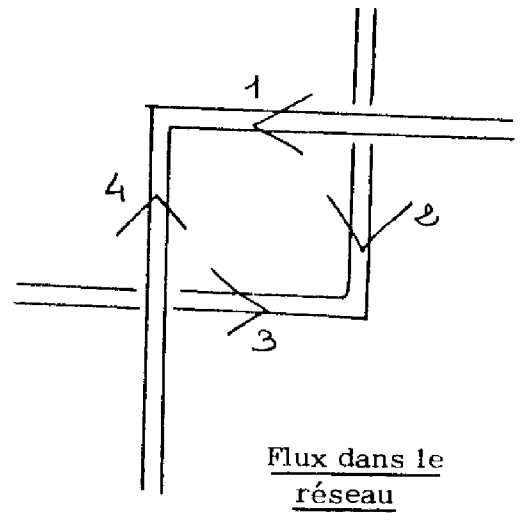


Figure 7



Flux dans le réseau

Figure 8

DESCRIPTION NUMERIQUE

N°	Débit Entrée	T D	%	D	%	G	%
1	400	0	0	0	0	0	0
2	0	19	100	0	0	0	0
3	400	0	0	0	0	0	0
4	0	18	100	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	7	50	0	0
7	100	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0
9	800	0	0	0	0	0	0
10	0	24	100	0	0	0	0
11	600	0	0	0	0	0	0
12	0	21	100	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0
17	0	3	100	0	0	0	0
18	0	23	100	0	0	0	0
19	0	7	30	22	100	0	0
20	0	1	100	0	0	0	0
21	0	0	0	20	100	7	20
22	0	11	100	0	0	0	0
23	0	9	100	0	0	0	0
24	0	17	100	0	0	0	0

MATRICE DE VOISINAGE

IDEB			
1200	0	0	400
0	1030	400	0
0	600	1020	0
800	0	0	1200

RECHERCHE PARTITION OPTIMALE

CRIT= 2200.00 1 2  
 CRIT= 0.00 1 4

COEF DE COUPLAGE = 0.00000

2ème cas : Dans le cas du réseau maillé déjà présenté, la solution n'est plus évidente. Notre méthode énumérative nous propose la partition optimale (1 2 6 7 8).

RAPPEL DE LA MATRICE DE VOISINAGE :

525	87	43	21	24	10	7	0	21	23
100	523	108	57	58	41	32	0	57	65
102	161	649	223	226	28	24	0	220	247
45	59	78	784	633	28	33	0	77	102
45	59	78	154	821	28	33	0	77	502
111	34	25	33	35	514	224	0	37	79
90	31	24	44	46	169	552	0	51	111
76	123	124	63	64	16	13	640	89	70
72	106	143	428	429	26	27	0	848	473
31	12	13	24	30	36	47	0	12	1029

RECHERCHE DE L'OPTIMUM

CRIT=	4255.00	1	2	3	4	5
CRIT=	4126.00	1	2	3	4	8
CRIT=	3022.00	1	2	3	6	7
CRIT=	2337.00	1	2	6	7	8

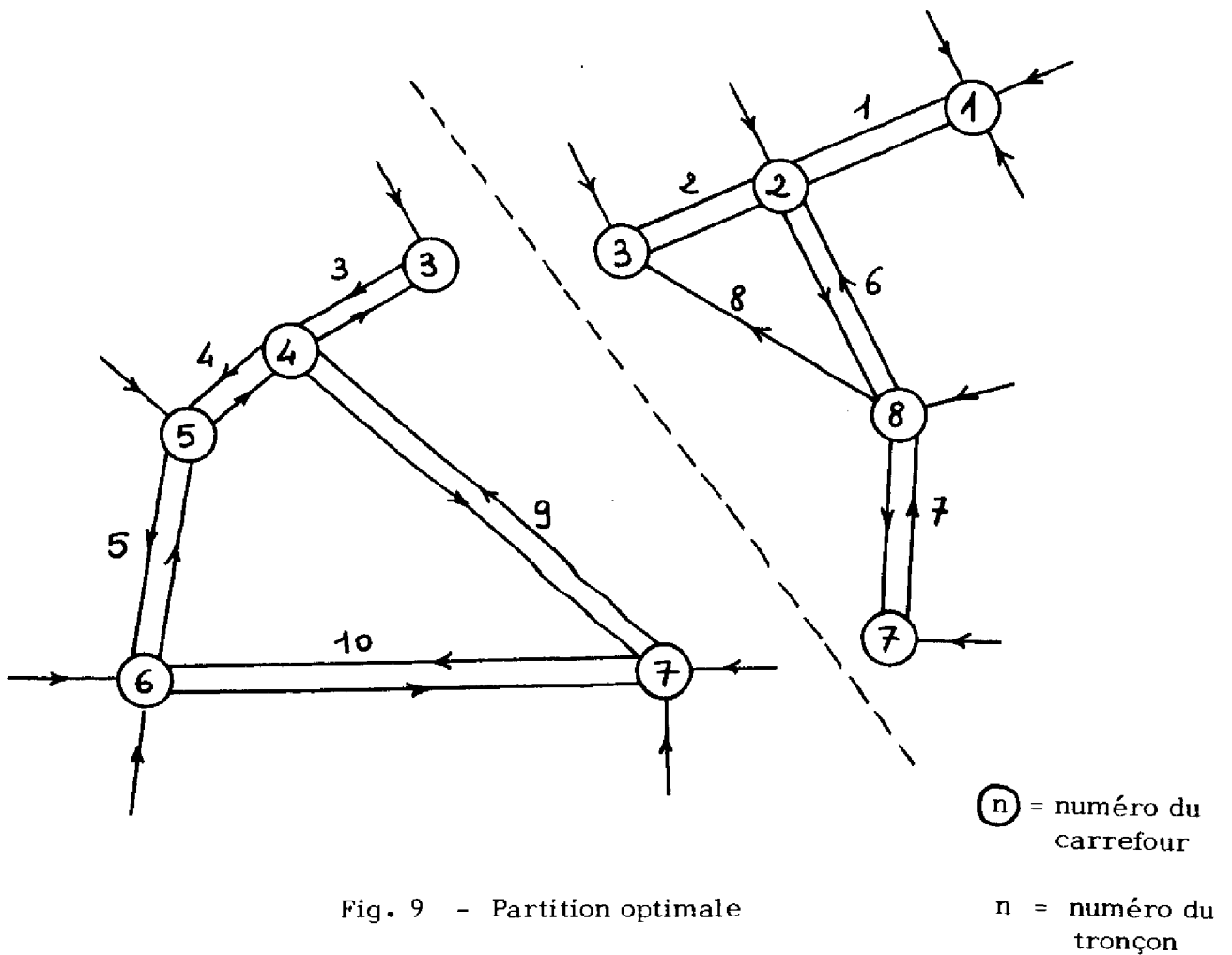


Fig. 9 - Partition optimale

II.1.i) - Conclusions - Le découpage d'un réseau en zones est un problème complexe et nous nous sommes limités à montrer comment nous l'avions appréhendé en lui donnant une forme matricielle simple. Il est sûr que dans la pratique on peut choisir a priori les zones comme englobant les grands axes de circulation. Notre travail peut cependant être utile dans le cas de réseaux maillés dans lesquels les coupures sont difficiles à réaliser.

## II.2. - Calcul de la valeur du cycle.

De la liste des facteurs qui doivent permettre de fixer la valeur du cycle que nous allons appliquer à chacune des zones précédemment définies, nous retiendrons seulement deux préoccupations qui nous semblent prépondérantes :

- Eviter la saturation
- Prendre en compte la "coordinabilité" de la zone.

Sur le premier point, de nombreux travaux ont été réalisés pour un carrefour considéré comme isolé et soumis à des arrivées aléatoires de véhicules (loi poissonienne ou uniformément répartis). Tous ces travaux (voir référence 1) arrivent à la conclusion que le cycle optimum est une fonction croissante de la charge du carrefour.

En milieu urbain, cependant, cette hypothèse des arrivées aléatoires de véhicules n'est pas toujours réaliste car le trafic est le plus souvent pulsé par les carrefours amonts. De ce fait, il nous a semblé indispensable de tenir également compte de l'influence que la valeur du cycle peut avoir sur la qualité de la coordination. C'est cette aptitude du réseau à être plus ou moins bien coordonné que nous appelons "coordinabilité".

Pour analyser cette influence, nous avons étudié le temps d'attente des véhicules dans une artère de 5 carrefours en fonction du cycle, la demande étant maintenue constante. Cette étude a été réalisée en utilisant le modèle de simulation numérique du L.A.A.S. que nous présenterons plus loin, et nous mesurerons la coordinabilité du réseau par le temps d'attente minimum, ramené à une heure de fonctionnement.

## DESCRIPTION DU RESEAU

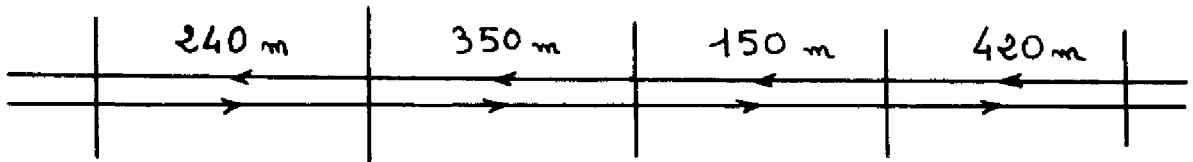
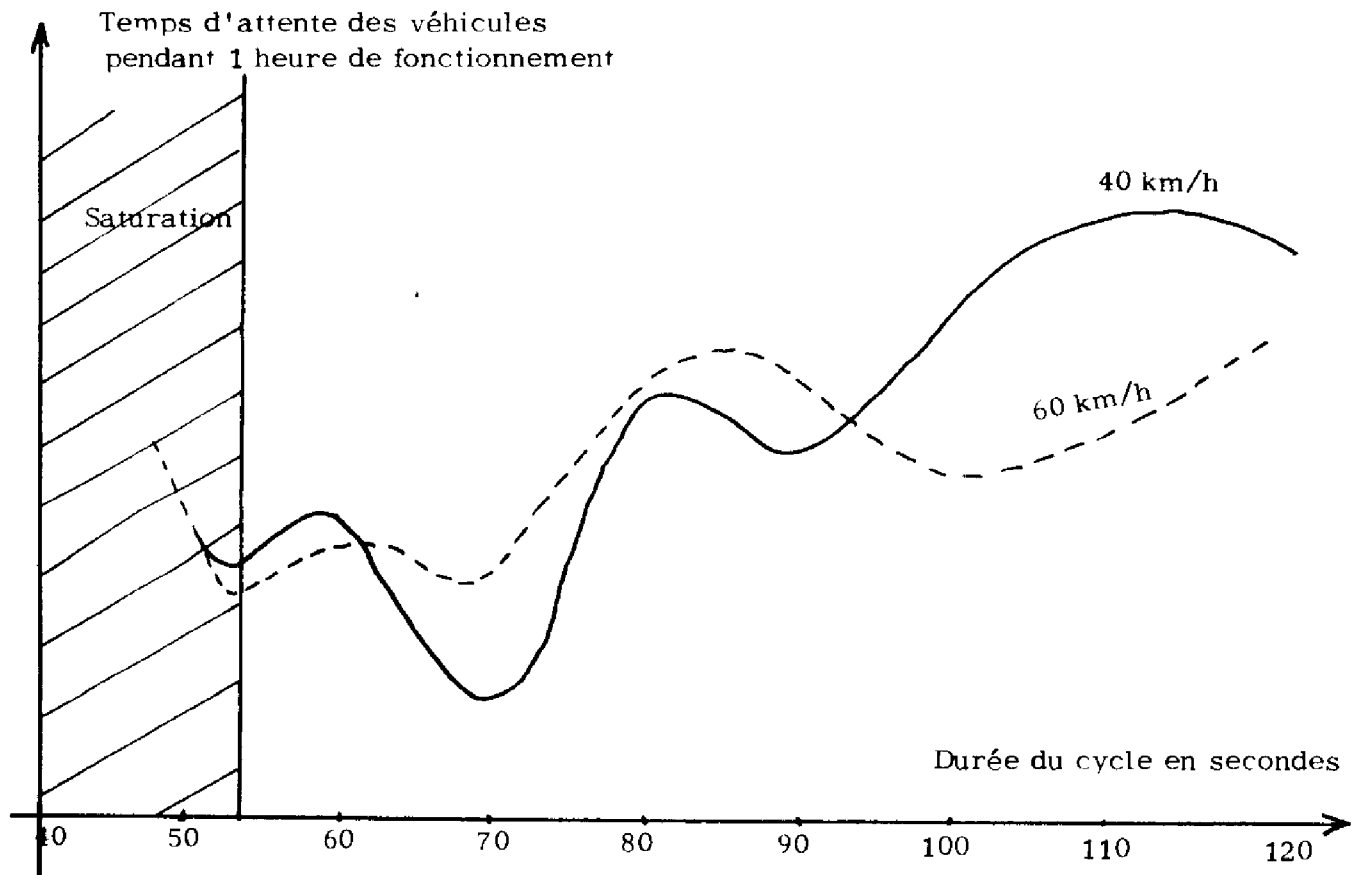


Figure 10

RESULTATS

- Figure 11 -



Il est à noter que le modèle de simulation utilisé ne tenait pas compte du temps perdu par cycle au démarrage ni des interactions entre véhicules à l'approche de la saturation, phénomènes prépondérants lorsque le cycle devient petit. De ce fait là, notre étude n'a de sens que pour des valeurs suffisamment grandes du cycle. Dans cette plage de variations, nous constatons que pour un réseau donné, certaines valeurs du cycle se prêtent mieux que d'autres à la coordination. Il apparaît que la "coordinabilité" est une fonction du cycle à allure périodique et est très sensible à la vitesse des véhicules.

En conclusion, notre brève étude laisse entrevoir que le choix du cycle commun aux feux d'une zone devra concilier les conditions de non saturation avec une bonne "coordinabilité". Néanmoins, de nombreux travaux (voir référence 1) ont montré que la valeur du cycle n'est pas toujours critique et ce réglage semble, sur certains réseaux, moins sensible que celui des décalages que nous allons traiter dans le chapitre suivant.

-----



## CHAPITRE III

### ETABLISSEMENT D'UN PLAN DE COORDINATION

#### III.1. - Le Modèle

##### III.1. a) - Introduction

La valeur du cycle de la zone ayant été choisie ainsi que les splits de chacun des carrefours, le temps d'attente des véhicules dans le réseau dépend encore fortement du choix de l'ensemble des décalages que nous appellerons : plan de coordination.

L'Etablissement d'un tel plan est un problème important dont la résolution nécessite la mise en place et l'utilisation d'un modèle de simulation permettant de mesurer un critère de choix.

Dans ce domaine, les deux méthodes les plus utilisées jusqu'à ce jour sont :

- la méthode retard-décalage
- la méthode Transyt.

##### La méthode Retard-Décalage

Elle utilise le modèle de simulation macroscopique du même nom dans lequel est faite l'hypothèse que le temps perdu dans un chaînon ne dépend que du décalage entre les deux feux extrémités de ce chaînon. Ce modèle suppose en effet que les véhicules entrants sont uniformément répartis sur tout le vert (mouvement va tout droit) puis sur tout le rouge (mouvements tournants). Cette simplification extrême, rendant l'histogramme de débit d'entrée indépendant du réglage des chaînons voisins, supprime tout couplage et permet de donner le jour à un algorithme simple de résolution.

Cependant, si le réseau est complexe, la méthode d'optimisation est longue car un très grand nombre de cas sont explorés.

##### La méthode Transyt (Traffic Network Study Tool).

Elle utilise un modèle de simulation macroscopique travaillant sur les débits instantanés fonction du réglage des feux. Ces débits sont propagés dans

les différentes branches, respectant ainsi les couplages entre chaînons. Ce modèle est plus réaliste et plus fin que le modèle Retard-Décalage mais la méthode d'optimisation du plan de coordination est plus délicate, la finesse du modèle rendant l'optimisation longue et la programmation délicate.

Aucune de ces deux méthodes, à cause du temps de calcul ou de l'occupation mémoire, ne pouvait convenir à l'objectif que nous nous étions fixé, à savoir : mettre en place une méthode de calcul des décalages opérationnelle en temps réel sur un petit ordinateur de processus (C I I 10 010).

Le L.A.A.S. a donc mis en oeuvre une simulation numérique devant satisfaire les deux contraintes suivantes :

- faible occupation mémoire
- temps de simulation le plus faible possible.

Ce modèle étant à la base de tous nos travaux concernant l'établissement des plans de coordination, nous nous permettons de le décrire en détail.

### III.1. b) - Présentation du modèle de simulation numérique du L.A.A.S.

Le modèle actuel de simulation numérique du L.A.A.S. est un modèle macroscopique déterministe qui s'applique à l'étude des réseaux de structure géométrique quelconque et qui est valable (tout comme les deux modèles précédents) pour les régimes périodiques fluides de trafic.

#### III.1. b.1) - Modèle de simulation par Bandes

Dans le modèle L.A.A.S., l'écoulement des véhicules est représenté par des bandes à densité fixée ; la largeur de la bande est fonction du débit dans la voie (1 véh./2 secondes). Grâce à ce type de représentation, il est possible de tenir compte des couplages entre chaînons.

Cette hypothèse du déplacement par pelotons est classique et a déjà été utilisée par Little et Morgan pour leur méthode d'optimisation de l'onde verte de longueur maximale. Néanmoins il nous a semblé nécessaire de la justifier par des mesures sur site et pour cela, nous avons réalisé une chaîne de mesure

spécifique permettant de reconstituer sur un diagramme espace-temps le passage réel des véhicules en un point donné.

Remarquons que cette chaîne d'acquisition semi-automatique, qui nous sert ici de moyen de validation de notre modèle par bande, constitue d'une façon plus générale un outil très souple de saisie des caractéristiques du trafic et du réglage des feux, tant sur une artère que pour un carrefour donné. Nous le présenterons plus en détail en annexe en montrant comment un ingénieur de trafic peut utiliser cet outil pour "photographier" une certaine situation de trafic ou de fonctionnement des feux et en permettre ainsi l'étude (voir annexe I).

En ce qui concerne la validation de l'écoulement par bandes, nous pouvons observer sur le diagramme ci-dessous relevé à deux carrefours peu éloignés (400 m) un exemple d'écoulement réel.

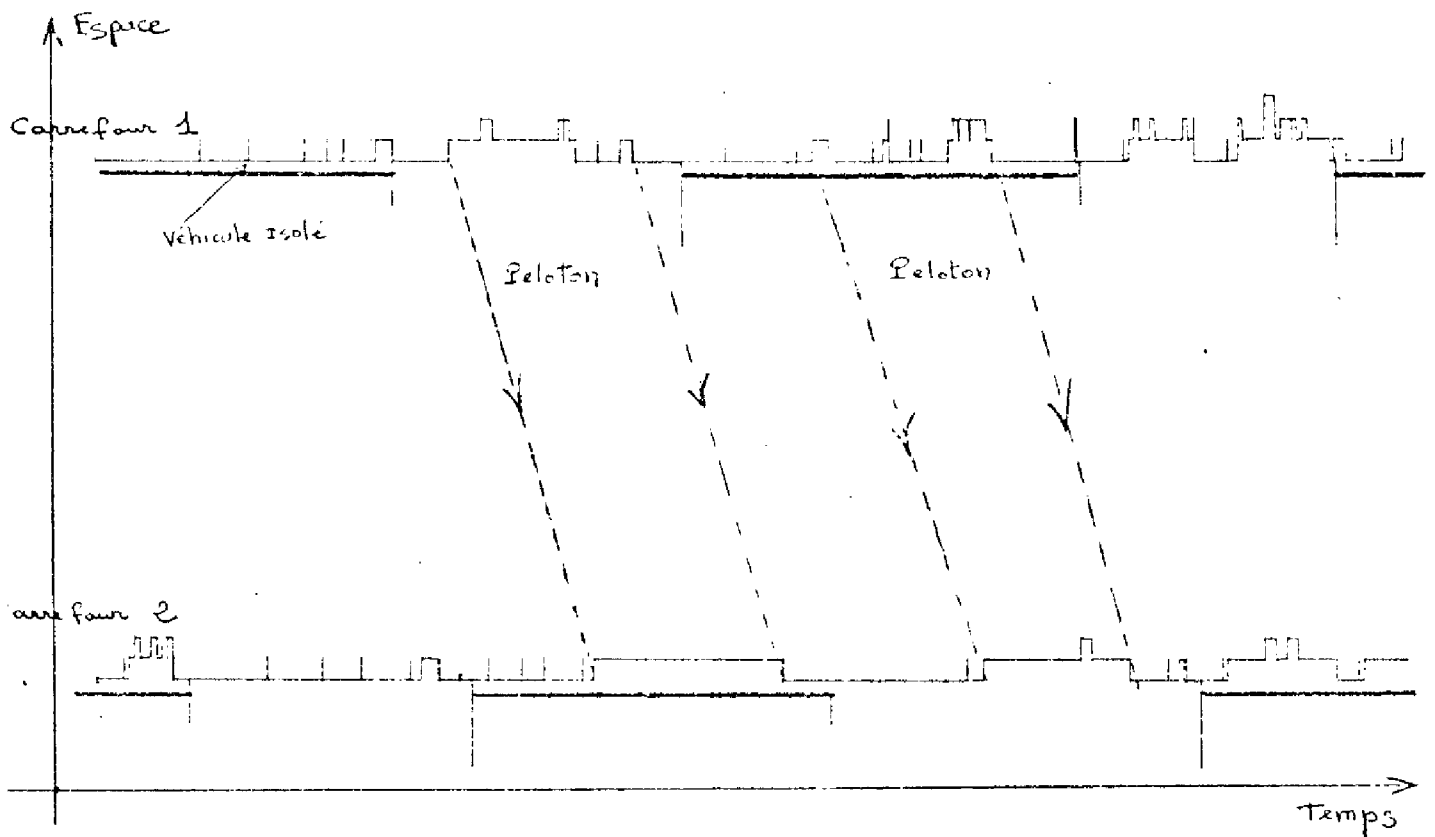


Figure 12 - Exemple d'écoulement réel

Nous pouvons tout d'abord constater que, dans le sens de circulation étudié, la coordination est mauvaise, ce qui agit sur le comportement des conducteurs.

- Les véhicules sortant du carrefour 1 pendant la phase verte sont condamnés à aller buter dans le rouge du carrefour 2, ce qui a pour effet d'étaler le peloton.
- Par contre, les véhicules provenant du tourne à gauche ou à droite (phase rouge) du carrefour 1 passent plus groupés au carrefour 2 : il y a un regroupement de ces mobiles en un seul peloton.

Ces phénomènes de diffusion et de regroupement, observés sur plusieurs cas d'écoulement sont cependant secondaires et ne masquent pas une certaine conservation des pelotons, justifiant ainsi notre modèle de propagation par bandes.

### III.1. b.2) - Propagation des bandes entre deux carrefours.

Dans notre modèle, la densité des bandes reste fixe et tous les véhicules possèdent la même vitesse. Cependant, celle-ci peut être modulée en fonction du taux d'occupation de la voie par la relation non linéaire ci-dessous.

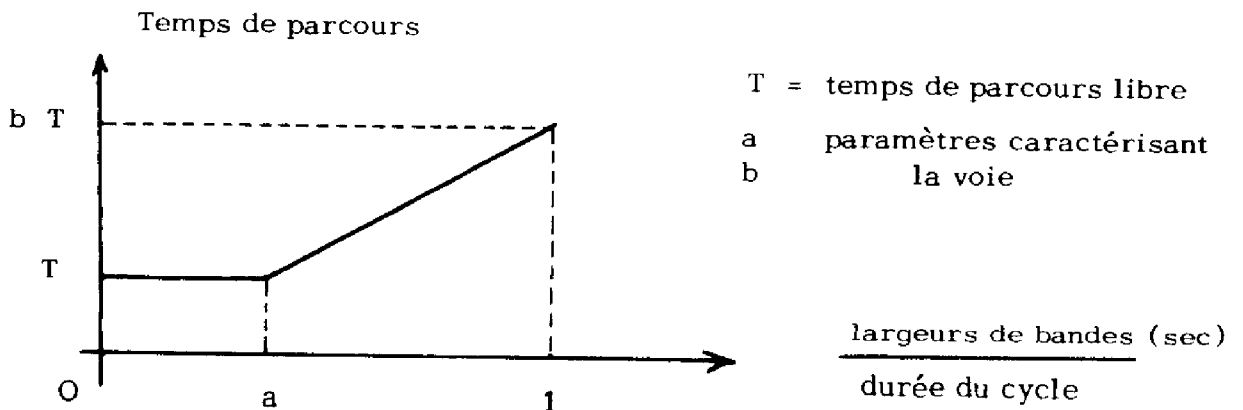
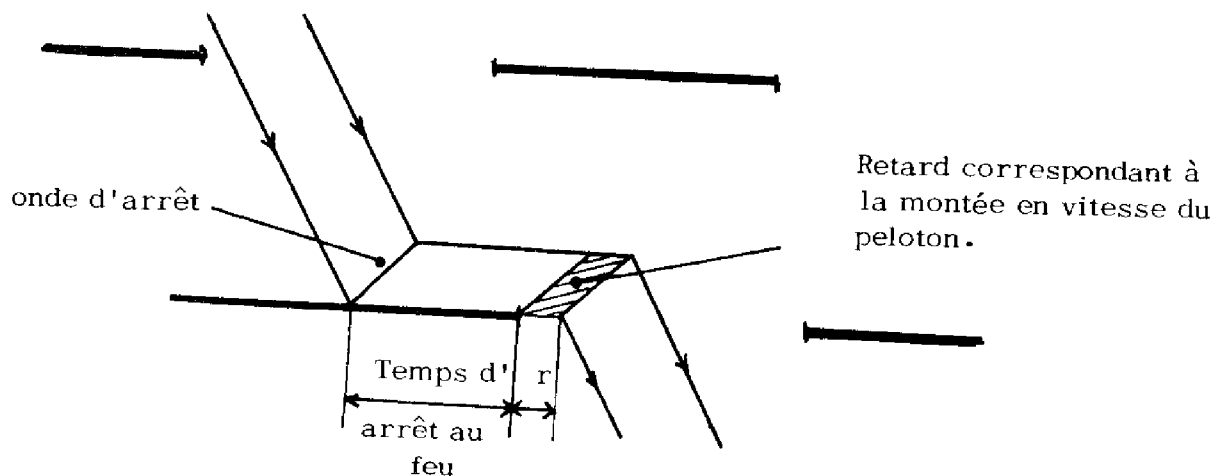


Figure 13

$L_{oi}$  = Temps de parcours en fonction de la charge du tronçon.

De plus, toute bande arrêtée à un feu subit un décalage dans le temps composé du retard introduit par le rouge et d'un retard supplémentaire correspondant au temps de montée en vitesse du peloton de véhicules. Ce retard  $r$ , inclus dans le modèle de propagation, peut être ajusté suivant les caractéristiques du carrefour.



- Figure 14 -

Loi d'arrêt à un feu

### III.1. b.3) - Orientations dans un réseau maillé.

Sur un réseau maillé, l'existence des bouclages rend l'arrivée des pelotons en un point tributaire de tous les réglages et débits intermédiaires. De ce fait, une simulation exacte du réseau exige de suivre l'écoulement des véhicules sur l'ensemble de la zone représentée et, dans le cas général, la détermination de ce régime périodique d'écoulement nécessite une simulation itérative des boucles, coûteuse en place mémoire et en temps de calcul.

#### (a) - Injection des débits transverses.

Tout comme les simulations des méthodes Retard-Décalage et Transyt, nous avons résolu ce problème par l'ouverture des boucles et en traitant

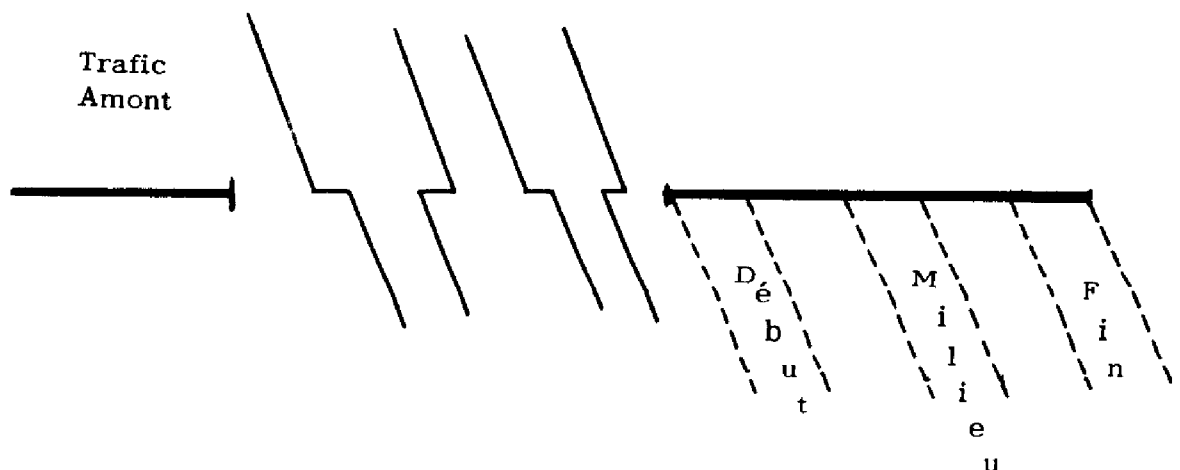
suivant un mode particulier l'injection des nouveaux arrivants pendant le rouge d'une phase.

Dans notre modèle, l'ensemble des véhicules provenant des voies transversales est, en effet, regroupé en une bande unique qui peut être calée en début, milieu ou fin de rouge. La solution retenue doit résulter d'une observation locale des mouvements de trafic qui dépendent, entre autre, de l'agencement des phases au niveau de ce carrefour. Cette opération revient, en quelque sorte, à figer les couplages transversaux, lesquels avaient été négligés par le modèle de simulation. Les débits ainsi "positionnés" pouvant être très importants, il faut être très prudent sur le choix de la position de ces bandes.

(b) - Disparition de véhicules de la bande amont

Parmi tous les véhicules constituant une bande arrivant à un carrefour, un certain nombre vont tourner à droite ou à gauche sur les transversales et, de ce fait, la bande aval après passage du carrefour sera amputée d'autant de véhicules. Sur notre modèle, nous avons choisi d'effectuer un rétrécissement bilatéral de la bande amont, calculé à partir d'un pourcentage moyen de disparition.

REPRESENTATION DES MODIFICATIONS DE FLUX AU NIVEAU D'UN CARREFOUR



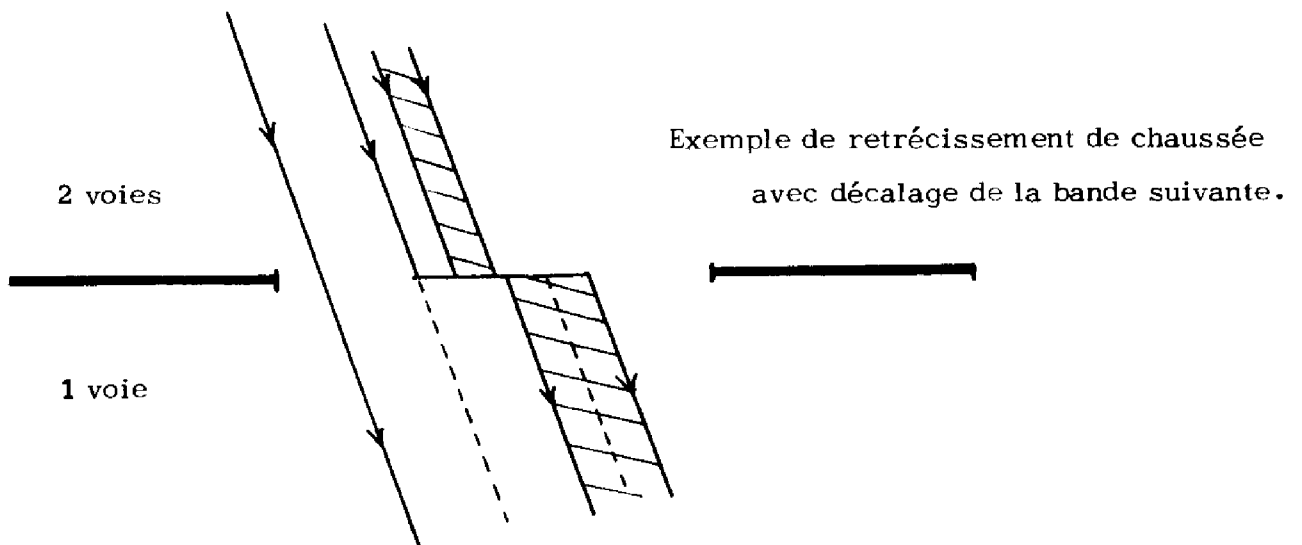
Retrécissement bilatéral représentant la disparition des véhicules ayant tourné à droite ou à gauche vers les transversales.

Trafic provenant des voies transversales et pouvant être positionné en début, milieu ou fin de rouge.



(c) - Changement du nombre de voies

La représentation adoptée jusqu'à présent est valable pour des voies à une seule file de circulation. Si les voies sont à double file, il faut réduire par deux la largeur des bandes et doubler le critère. Plus généralement, lors du passage d'une artère de  $n_1$  files à une artère comportant  $n_2$  files, la largeur de la bande est multipliée par  $n_1/n_2$  et le critère par  $n_2/n_1$ . Notons que dans le cas d'un rétrécissement de la chaussée, il se produit dans notre modèle un élargissement de la bande qui peut, si le flux est fractionné, venir perturber les bandes suivantes qu'il faut par conséquent décaler. De plus, on rajoute au retard un terme tenant compte de la gêne ainsi provoquée.



- Figure 16 -

### III.1. b.4) - Formation des queues et évaluation du critère.

L'arrivée des pelotons à un feu rouge génère des queues que l'on peut représenter par le schéma ci-dessous.

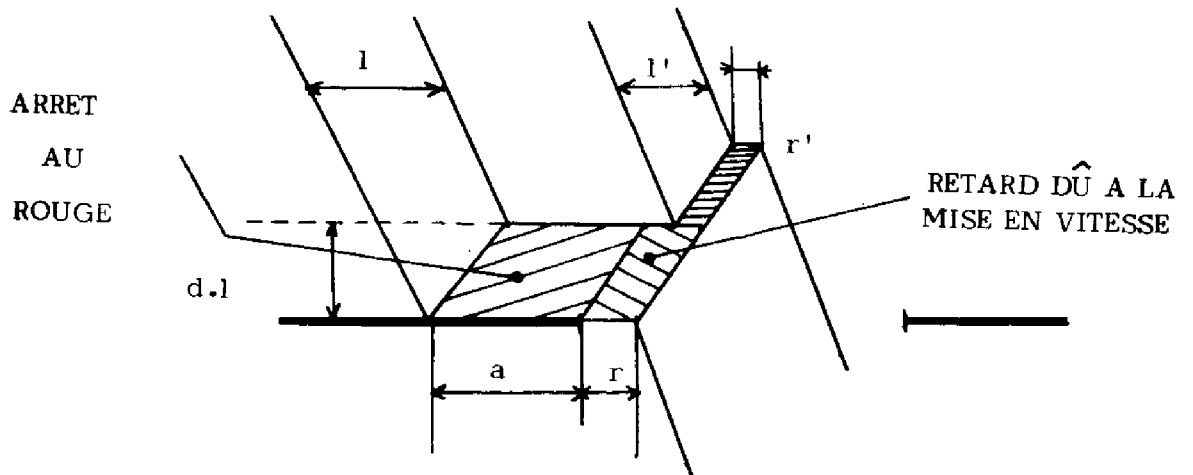


Figure 17 - Calcul du critère

Le retard provoqué par un tel arrêt est alors égal à :

$$R = \frac{d}{c} [ l \cdot (a + r) + l' \cdot r' ] \quad (\text{véh.} \times \text{s} / \text{s})$$

avec

$d$  = densité de la bande (véh. / s)

$l, l'$  = largeur de bandes (s)

$a$  = durée de l'arrêt au rouge (s)

$r, r'$  = mises en vitesse (s)

$c$  = durée du cycle (s)

Ce retard correspond à la somme des aires hachurées.

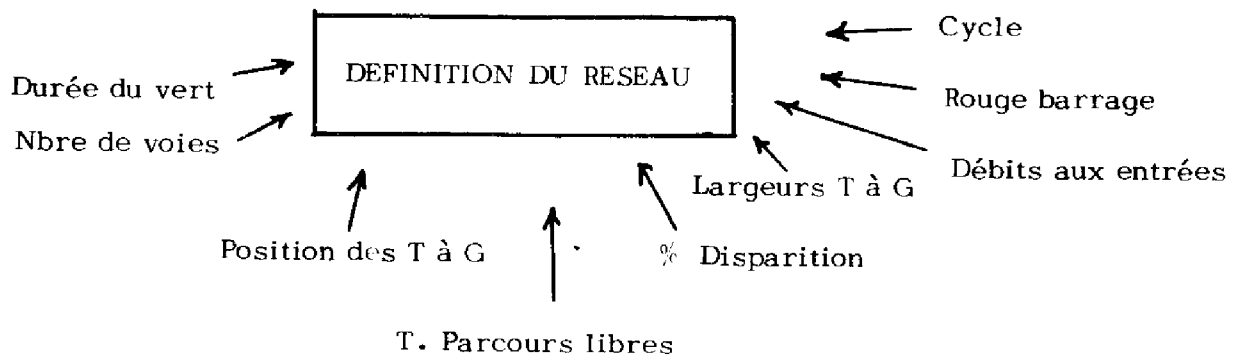
Remarque : Il est également très facile, sur notre modèle, d'obtenir le critère :

$N_a = \frac{d \cdot l}{c}$ , nombre d'arrêts par seconde et, de ce fait, toute pondération du temps d'attente par le nombre d'arrêts.

### III.1. c) - Mode d'utilisation et performances de la simulation L.A.A.S.

#### III.1. c. 1) - Tables de simulation

L'information concernant une simulation numérique doit être rentrée dans différentes tables de notre modèle après une période d'observation et d'étude du réseau. Les grandeurs à observer sont notées dans le schéma ci-dessous :



- Figure 18 -

#### Description d'un réseau à simuler

S'il s'agit de tester seulement une politique fixe, il faut préciser, en outre, les décalages absolus correspondants.

Une simulation numérique est entièrement définie par cinq tables qui sont :

- La table des liaisons : Elle effectue une description géométrique du réseau définissant l'ordre et le nombre des phases sur les différents axes. Elle précise aussi quels sont les points d'entrée du réseau.

- La table des phases : Chaque phase  $j$  du réseau est reliée à deux autres phases  $i$  et  $k$  connues par lecture de la table des liaisons. Pour cette phase  $j$ , la table des phases permet de connaître :

- Sa durée de vert.
- Son décalage absolu.

et, pour chacun des deux sens :

- le % de disparition I P
- la largeur et position de la bande tournante I G
- le temps de parcours libre I T

- la somme des largeurs de bande (calculée) I L
- le nombre de voies.
- La Table des Contraintes : Elle permet de définir la loi de construction du décalage absolu de chacune des phases à partir des décalages de commande adoptés.
- La Table des Rotations : Chaque fois que, à partir du décalage absolu d'une phase, nous voulons calculer l'instant de début de vert d'une phase complémentaire (c'est-à-dire appartenant au même carrefour), nous avons besoin d'une information (durée en seconde), appelée rotation, et qui caractérise l'organisation des phases à ce carrefour. A cycle fixe, la rotation est une constante à lire dans la table des rotations. La table des contraintes, complétée par la Table des rotations, sert donc de support à un calcul matriciel permettant de reconstruire tous les décalages à partir d'une base de commande choisie au départ.
- La Table du nombre de voies : Elle permet de tenir compte des phénomènes engendrés par les éventuels retrécissements ou élargissements de chaussée.

### III. 1. c.2) - Aides à la simulation

De façon à faciliter l'utilisation de ce modèle numérique, le laboratoire a développé de nombreux aides à la simulation.

Pour la création des tables, nous disposons d'un sous-programme **FORTRAN** qui, à partir des débits d'entrée, d'une description du réseau et des pourcentages d'orientation, effectue des calculs de largeur de bande sur les branches d'entrée ainsi que pour les mouvements tournants. Ces informations sont converties en hexadécimal puis classées automatiquement dans l'ordre de leur implantation dans la mémoire du C.I.I. 10 010.

Pour la vérification du bon fonctionnement de la simulation, des programmes d'aide à la mise au point permettent un contrôle rigoureux.

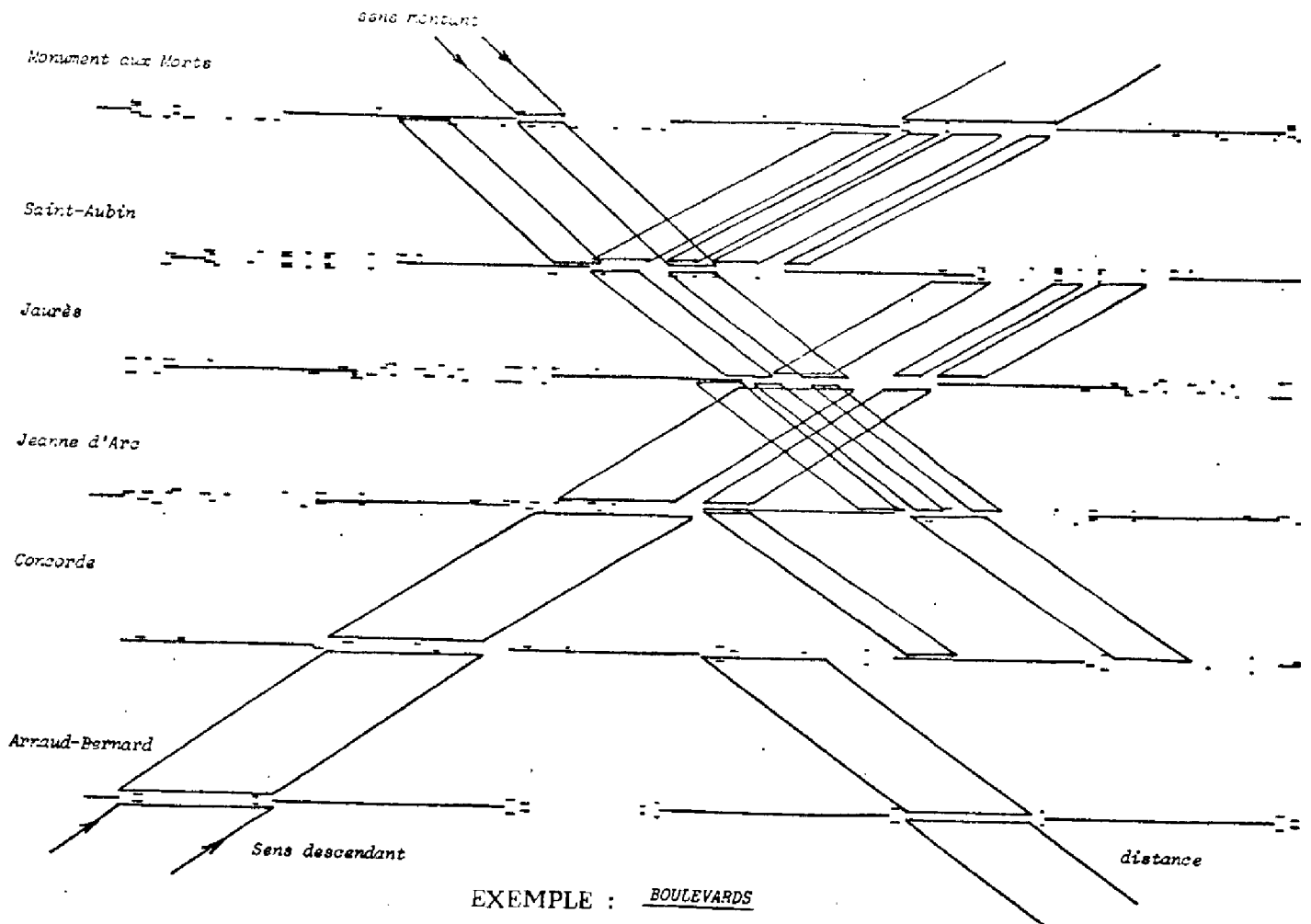
- Par édition des Tables de Simulation.

FON	CAV	CAN	*	IV	IDA	*	IF	IG	IT	IL	*
002	002	001	*	037	000	*	153	102	030	002	002
000	003	002	*	018	070	*	178	103	020	004	003
000	004	003	*	057	050	*	050	103	037	006	002
000	005	004	*	057	060	*	050	110	005	012	002
000	006	005	*	052	060	*	000	000	030	016	002
000	000	006	*	044	070	*	000	000	000	016	002
003	005	006	*	044	070	*	075	102	035	010	002
001	004	005	*	052	060	*	012	000	005	005	002
001	003	004	*	057	050	*	050	103	030	005	002
001	002	003	*	057	050	*	025	103	020	006	002
001	000	001	*	037	000	*	000	000	050	007	003
002	003	007	*	029	037	*	038	201	032	010	002
000	009	005	*	045	050	*	025	003	035	008	002
000	000	009	*	030	050	*	000	000	000	010	002
003	003	009	*	030	050	*	050	103	037	005	002
001	010	008	*	045	030	*	025	001	025	006	002
001	000	010	*	025	004	*	000	000	000	006	002
002	012	011	*	035	011	*	000	000	000	000	002
003	011	012	*	040	005	*	019	000	020	020	002
001	000	011	*	035	011	*	000	000	000	017	002
002	014	013	*	035	021	*	100	107	052	000	002
000	000	014	*	031	036	*	000	000	000	007	002
003	013	014	*	031	036	*	019	202	052	015	002
001	000	013	*	035	021	*	000	000	000	015	002
002	016	015	*	043	018	*	075	018	050	005	002
000	000	016	*	027	021	*	000	000	000	020	002
003	015	016	*	027	021	*	100	103	060	000	002
001	000	015	*	045	018	*	000	000	000	005	002

- Figure 19 -

Table de visualisation de la simulation

- Par tracé automatique de l'écoulement simulé pour une politique de feux donnée.



- Figure 20 -

Exemple de tracé automatique

- Enfin, il est possible de mesurer séparément les temps d'attente infligés aux véhicules sur des zones à préciser :

- |                   |   |                         |
|-------------------|---|-------------------------|
| Critères partiels | - | par carrefour           |
|                   | - | par tronçon             |
|                   | - | par sens de circulation |
|                   | - | par zone                |

### III.1. c.3) - Performances

Le but que nous nous étions fixés, c'est-à-dire la rapidité, semble être bien atteint par notre modèle qui est particulièrement performant sur ce point, le temps de simulation d'un tronçon étant de l'ordre de 6 ms.

A titre d'exemple, signalons que pour une zone de 10 tronçons et 6 carrefours (donc 5 décalages à calculer), l'obtention du critère temps d'attente pour un réglage des feux fixé, nécessite environ 60 ms ; ce qui nous permet, par la méthode d'optimisation que nous présentons plus loin, d'obtenir un plan de coordination en 12 secondes de calcul.

### III..2. - Optimisation des décalages d'un réseau maillé.

#### III.2. a) - Formulation générale du problème

Le cycle et les splits étant fixés, il s'agit maintenant pour nous de déterminer la valeur des décalages du réseau, c'est-à-dire les instants de début de vert de chacune des phases et ceci en minimisant un certain critère réparti sur l'ensemble du réseau et qui est généralement une fonction hautement non linéaire de chacun des décalages.

De plus, lorsqu'il s'agit de fixer les décalages d'un réseau maillé possédant  $n$  noeuds et  $b$  branches, seuls  $(n-1)$  décalages, disposés en arbre sont indépendants : ils forment alors une base et les autres décalages s'en déduisent par utilisation des relations linéaires de maille.

Sur un réseau maillé, l'établissement d'un plan de coordination peut donc se formuler comme un problème de minimisation avec contraintes d'une fonction non linéaire, multivariable.

<u>Notations</u> :	$n$	=	nombre de noeuds
	$b$	=	nombre de branches
	$d_i$	=	décalage dans le tronçon $i$
	$\underline{d}$	=	$\{ d_i \}_{i=1, b}$ : plan de coordination
	$f_i(d)$	=	critère dans le tronçon $i$ .

Problème généralminimiser

$$f(\underline{d}) = \sum_{i=1}^b f_i(\underline{d})$$

en respectant les  $b - n + 1$  relations de maille.

$$r_i(\underline{d}) = 0$$

$$i = 1, \dots, b - n + 1$$

III.2. b) - Influence du modèle sur la méthode d'optimisation.

La méthode d'optimisation la plus apte à résoudre le problème précédent dépend évidemment des propriétés des fonctions  $f_i(\underline{d})$  c'est-à-dire du critère choisi et du modèle permettant de l'obtenir.

- Dans le modèle retard décalage, par exemple, les fonctions  $f_i(\underline{d})$ , représentant le temps d'attente des véhicules dans le tronçon  $i$  ont la propriété d'être monovariabiles :

$$\frac{\partial f_i(\underline{d})}{\partial d_j} = 0, \quad \forall j \neq i$$

Le problème prend alors la forme particulière :

$$\begin{array}{l|l} \text{minimiser} & f(\underline{d}) = \sum_{i=1}^b f_i(d_i) \\ \text{avec} & r_i(\underline{d}) = 0 \\ & i = 1, \dots, b - n + 1 \end{array}$$

et cette simplification permet de donner le jour à une méthode systématique de résolution.

- Dans les modèles plus réalistes, les fonctions  $f_i(\underline{d})$  sont multivariabiles et le problème est plus délicat.

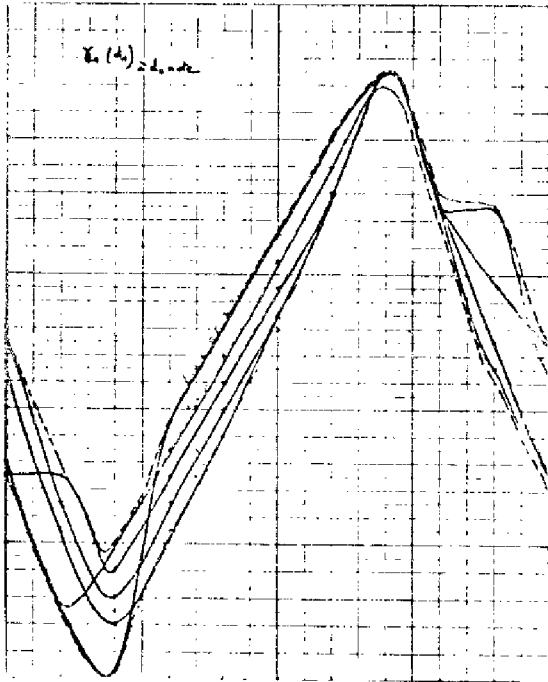
A titre d'exemple nous montrons les couplages qui peuvent exister entre deux tronçons adjacents, identiques et ceci pour plusieurs débits possibles. (voir figures 21 - 22).

Pour résoudre, dans ce cas, le problème de l'établissement d'un plan de coordination, nous proposons une méthode en deux étapes :

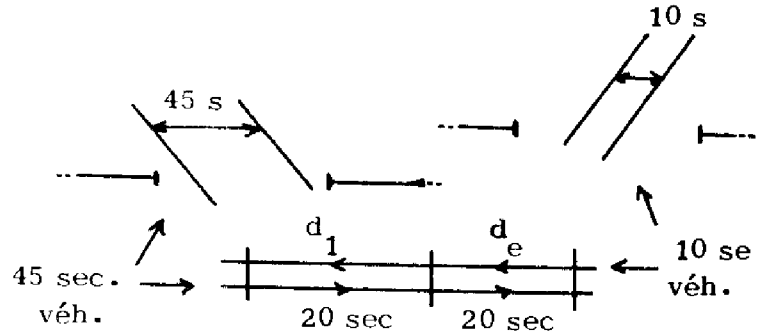


- 1) - choix d'une base de commande
- 2) - Application, sur cette base, d'une méthode d'optimisation dérivée de la méthode séquentielle.

Exemple d'Etude de couplage entre deux tronçons adjacents



- Figure 21 -  
Ecoulement dissymétrique

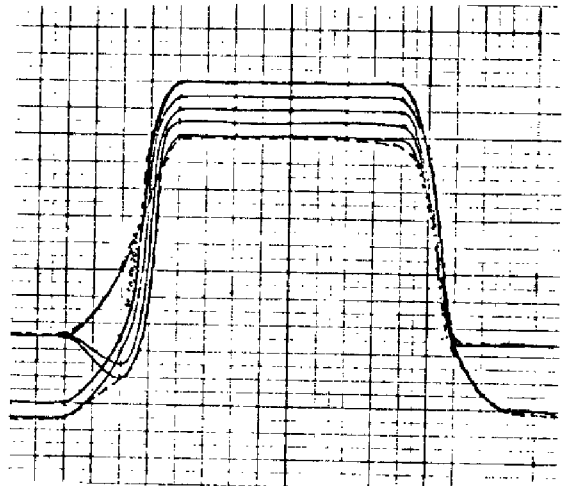
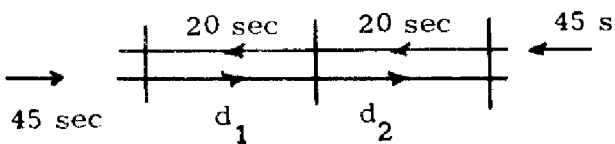


Pour différentes valeurs de  $d_2$ , décalage du tronçon voisin, nous avons étudié la courbe  $\gamma_1(d_1)$  critère dans le tronçon 1 en fonction de son décalage  $d_1$ . Nous voyons apparaître nettement l'influence de  $d_2$  sur  $\gamma_1(d_1)$ .

Ceci est dû au fait que sur notre modèle  $\frac{\partial f_i}{\partial d_i} \neq 0$  si j et i sont des chainons voisins.

L'importance de ces couplages dépend d'ailleurs de l'importance du trafic. La figure ci-dessus représente un écoulement dissymétrique (45-10).

La figure ci-contre un écoulement symétrique (45-45)



- Figure 22 -  
Ecoulement symétrique

Ce travail a certes été réalisé avec le modèle numérique du L.A.A.S. mais nous avons peu utilisé les propriétés spécifiques de ce modèle et, pour cette raison, nous prétendons fournir une méthode applicable à tous les modèles de trafic qui tiennent compte de l'existence des couplages entre tronçons.

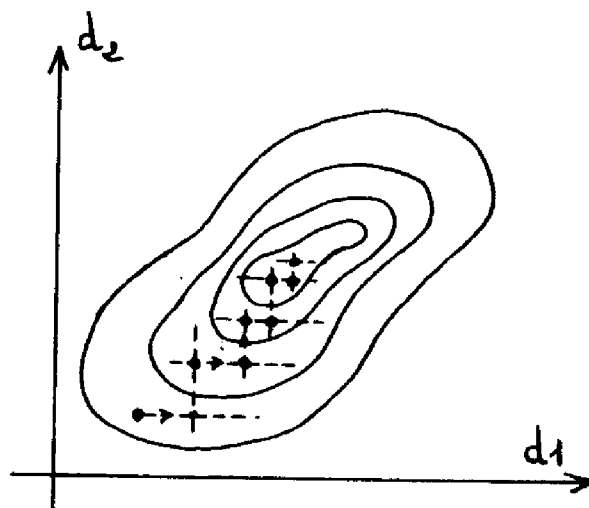
Pour la facilité de compréhension, nous présenterons tout d'abord la méthode d'optimisation choisie et ensuite un algorithme permettant de déterminer sur quels décalages devra s'appliquer la méthode d'optimisation.

### III.2. c) - Présentation de la méthode d'optimisation.

La méthode que nous avons adoptée est directement inspirée de la méthode séquentielle.

#### III.2. c. 1) - Rappel de la méthode séquentielle classique.

"Etant donné une fonction multivariable  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , la méthode séquentielle consiste à rechercher successivement et parallèlement à chaque axe le sens conduisant à une diminution de  $f$ . On progresse alors pas à pas dans cette direction jusqu'à réaugmentation de  $f$  et l'on recherche de nouveau une direction convenable".



- Figure 23 -

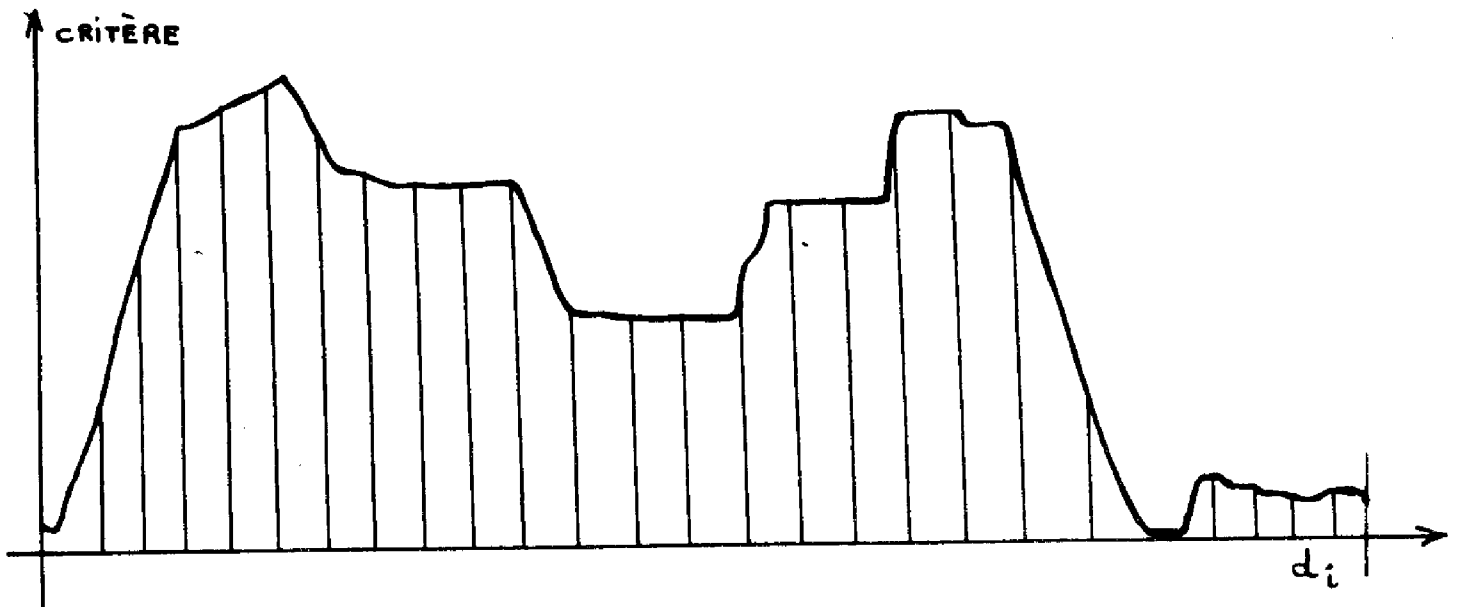
Méthode séquentielle classique

Cette méthode, très simple dans son principe, peut s'adapter à loisir aux propriétés des fonctions à minimiser : pas variable en fonction de la fréquence des changements, utilisation des propriétés géométriques dans le cas où les courbes de niveau sont homothétiques (méthode PARTAN) etc....

C'est la raison pour laquelle nous avons étudié l'allure de la surface de revenu de notre problème.

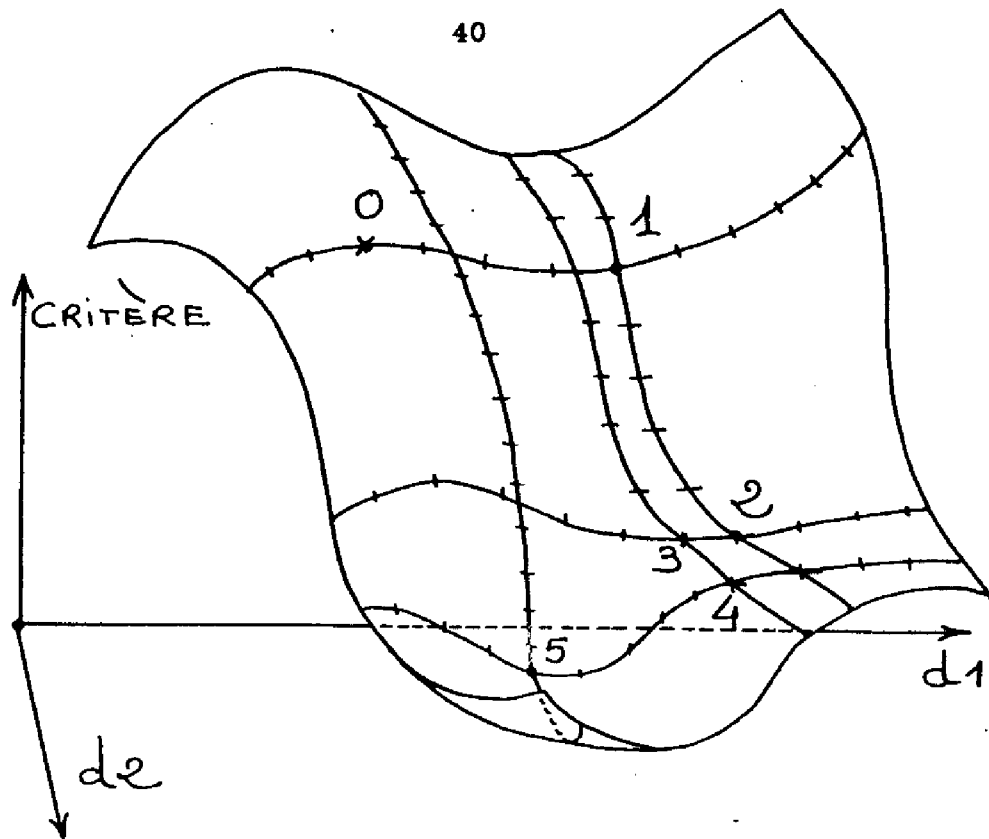
Pour le réseau d'étude adopté (voir description dans le chapitre II), et pour des débits moyens sur toutes les branches, les variations du critère suivant une direction parallèle à l'un des axes ont, par exemple, le profil suivant.

cycle = 100 sec, pas = 1 sec



Un exemple type des variations de la fonction critère suivant une direction parallèle à l'un des axes.

- Figure 24 -

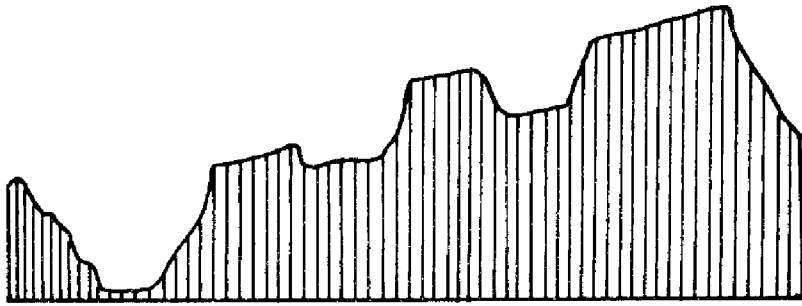


Exemple d'application de la méthode séquentielle  
modifiée au cas d'une surface peu tourmentée ( fonction  
critère continuellement dérivable )

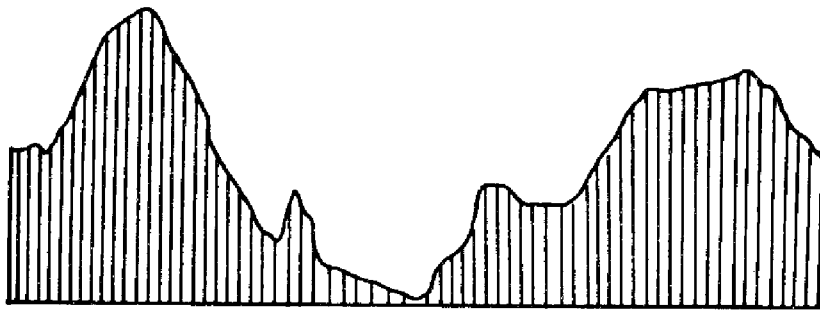
- Figure 25 -

III.2. c.2) - Analyse de l'hypersurface de revenu délivrée  
par notre modèle numérique.

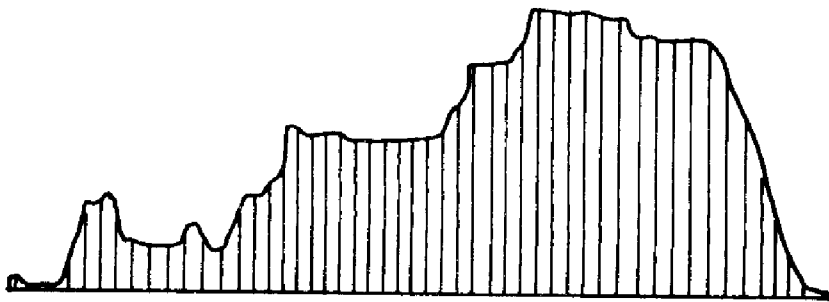
La figure précédente représente une surface n'ayant pas de discontinuités ni de cassures. Dans le problème réel, il en est tout autrement et la recherche d'un minimum est ainsi rendue plus délicate. C'est ce que nous avons voulu montrer en représentant, pour l'exemple testé les variations de la fonction critère suivant des directions parallèles aux axes de coordonnées. Rappelons que le réseau étudié possède 7 degrés de liberté et que la recherche du minimum sur chaque section constitue une séquence de notre méthode.



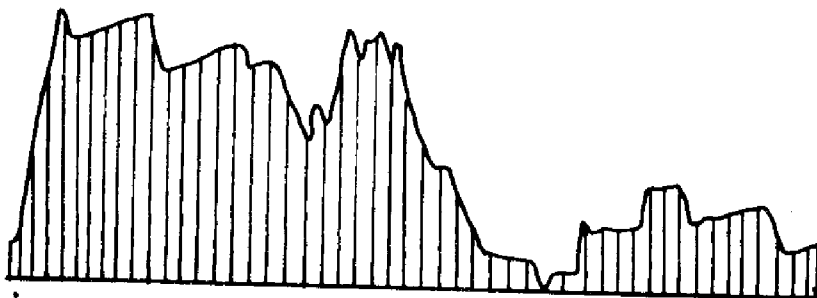
DIRECTION 1



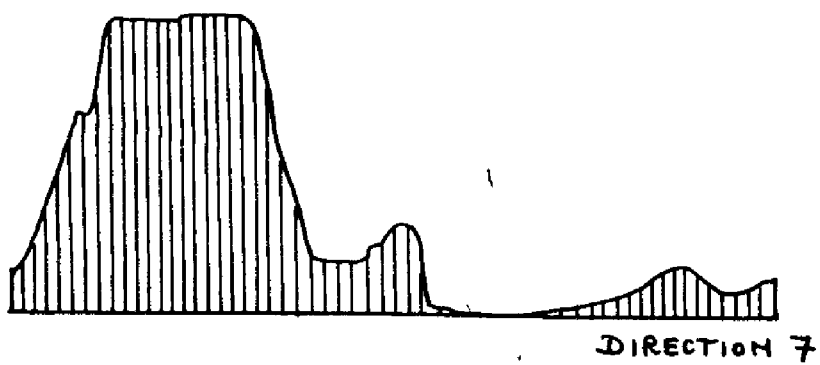
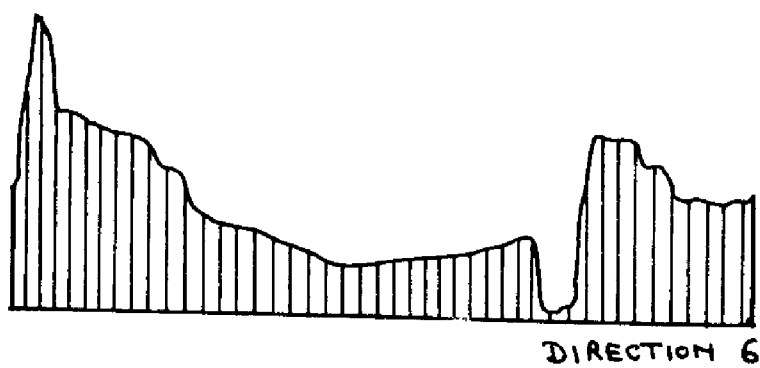
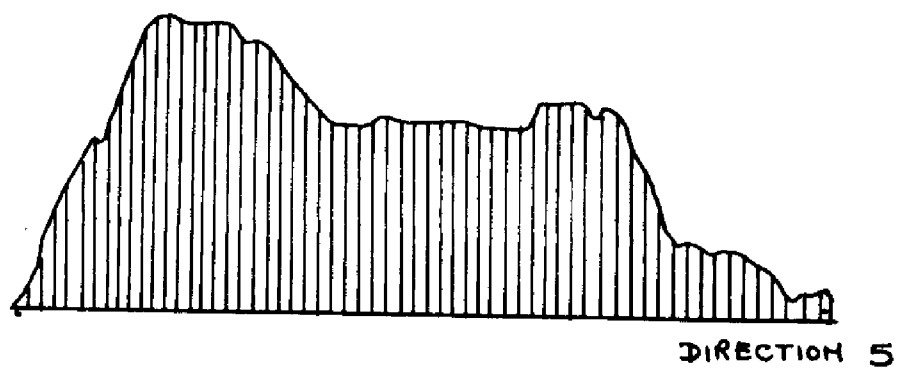
DIRECTION 2



DIRECTION 3



DIRECTION 4



- Figure 26 -

Variations du critère suivant les différentes directions d'exploration.

### III.2 d) - Modifications pour notre problème particulier.

L'allure d'une section de la surface de revenu laisse entrevoir que le problème qui nous concerne est hautement non linéaire. De ce fait, nous avons adapté légèrement la méthode séquentielle de façon à avoir une vision globale de chaque section de l'hypersurface et à s'affranchir ainsi de ses minima locaux, fatals aux méthodes classiques.

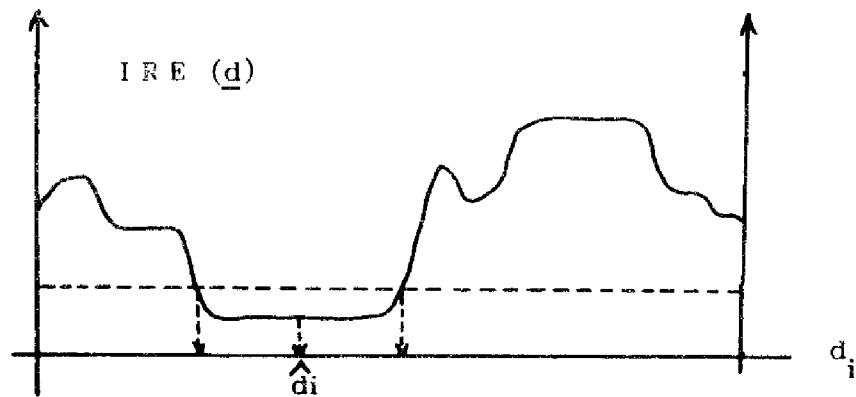
Nous transformons donc le problème en une séquence de minimisations de fonctions monovariabiles.

Formulation : Soit  $\{d_k, k = 1, N - 1\}$  un ensemble de variables qui permettent de définir tous les décalages absolus des carrefours constituant le réseau dont nous cherchons la politique optimale de coordination. Un tel ensemble sera appelé une base. Nous donnons plus loin un algorithme permettant de choisir une telle base.

Soit  $d_i$  l'une des composantes de la base  $\underline{d}$  : elle est définie modulo le cycle  $C$ . Grâce au modèle de simulation, nous calculons les  $n$  critères  $[IRE(p), p = 1, n]$  associés aux  $n$  valeurs différentes de  $d_i$   $[0 \leq d_i \leq c]$  et nous retenons la valeur optimale partielle  $d_i$  en résolvant le problème monovariabie

$$\min_{d_i} [IRE(\underline{d})] \Rightarrow \hat{d}_i$$

En raison de la nature particulière de ces sections, qui présentent souvent des minima plats, nous avons développé une méthode de "centrage" de  $d_i$ , permettant d'obtenir la politique optimale partielle présentant une sensibilité faible. (ce qui revient effectivement à centrer les bandes au milieu du vert).



- Figure 27 -

Exemple de "centrage" du décalage optimum permettant d'obtenir une sensibilité faible aux variations de l'écoulement.

La résolution du problème monovarié est donc simple et son résultat sert pour l'optimisation du décalage suivant.

En répétant ces optimisations partielles, il est possible, dans certaines conditions que nous allons préciser, de se rapprocher de l'optimum global. L'ensemble de la méthode peut alors se résumer par :

$$\left\{ \left( \min_{d_i} [IRE(\underline{d})] \right)_{i=1, B} \right\} K$$

$$\underline{d} = [\hat{d}_i, i = 1, B]$$

B = dimension de la base

$\underline{d}$  = plan de coordination obtenu à partir des décalages partiellement optimisés.

K = nombre d'itérations

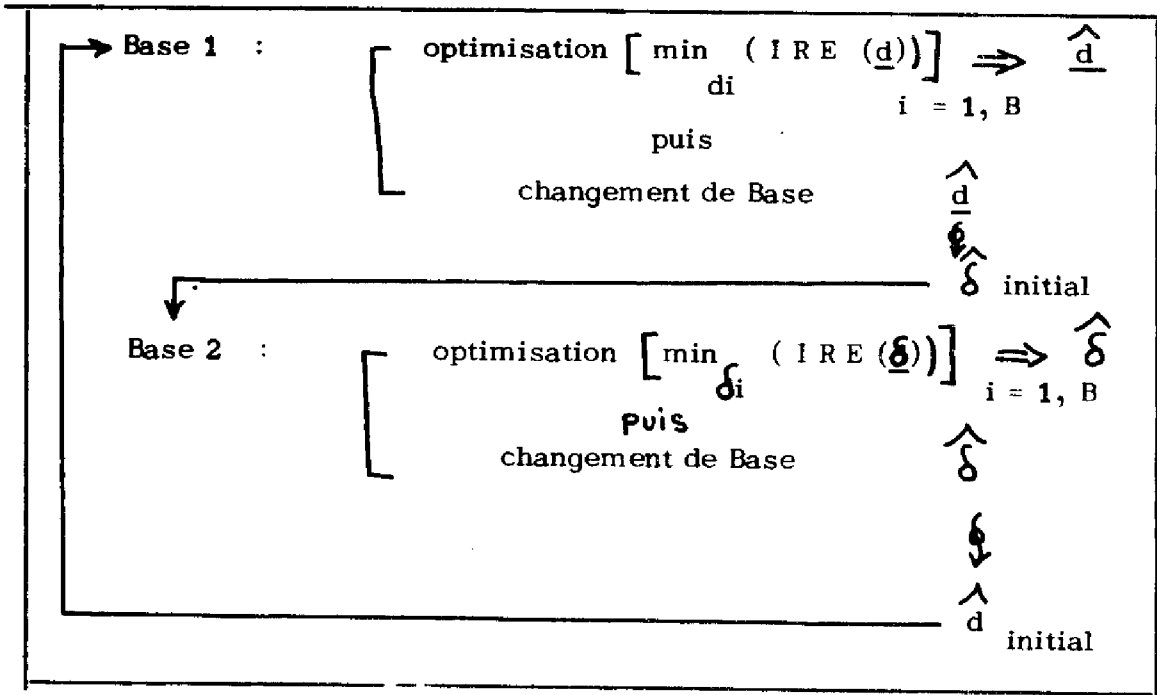
### III.2. d.1) - Première amélioration.

En pratique, nous avons observé que par la méthode ci-dessus, la convergence n'était pas totalement assurée et dépendait fortement des conditions initiales et de la base choisie (nous en donnerons, plus loin, les raisons).

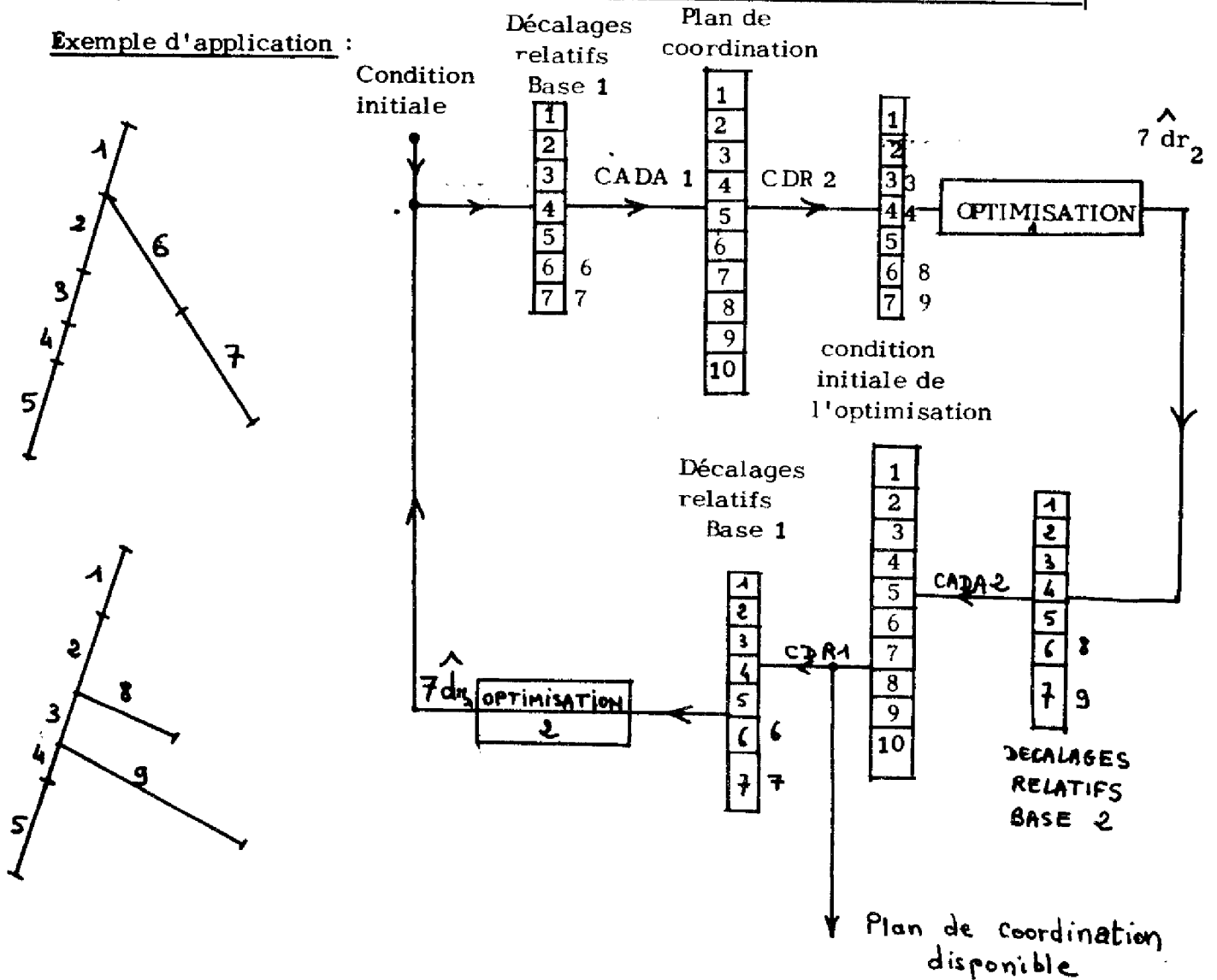
Nous avons apporté une première amélioration en effectuant l'optimisation alternativement sur deux bases différentes que nous noterons  $\underline{d}$  et  $\underline{s}$ .

La formulation de la méthode est la suivante :





Exemple d'application :



### III.2. d. 2) - Deuxième amélioration.

Une autre amélioration a été apportée en modifiant l'ordre d'exploration des bases.

Par exemple	$\hat{d}_1$	sera obtenu en explorant la base de	1, B
	$\hat{\delta}_1$	"	B, 1
	$\hat{d}_2$		B, 1
	$\hat{\delta}_2$	"	1, B

Cette procédure a, en particulier, été utilisée pour l'optimisation des décalages d'une artère où l'on effectuait à la fois un changement de base [ décalages relatifs, décalages absolus ] et une inversion de l'ordre d'optimisation (voir référence 9).

### CONCLUSIONS PARTIELLES

Malgré toutes les précautions prises, le résultat de l'optimisation dépend encore fortement de la condition initiale et surtout de la base de commande choisie, elle-même dépendant des débits dans le réseau.

Pour cette raison, nous avons jugé indispensable de compléter la méthode d'optimisation par une étude des couplages entre tronçons qui nous a permis de mettre au point une méthode de détermination d'une base convenable, opération préalable à toute application fructueuse de la méthode précédente. L'organigramme de principe de notre algorithme sera alors le suivant :

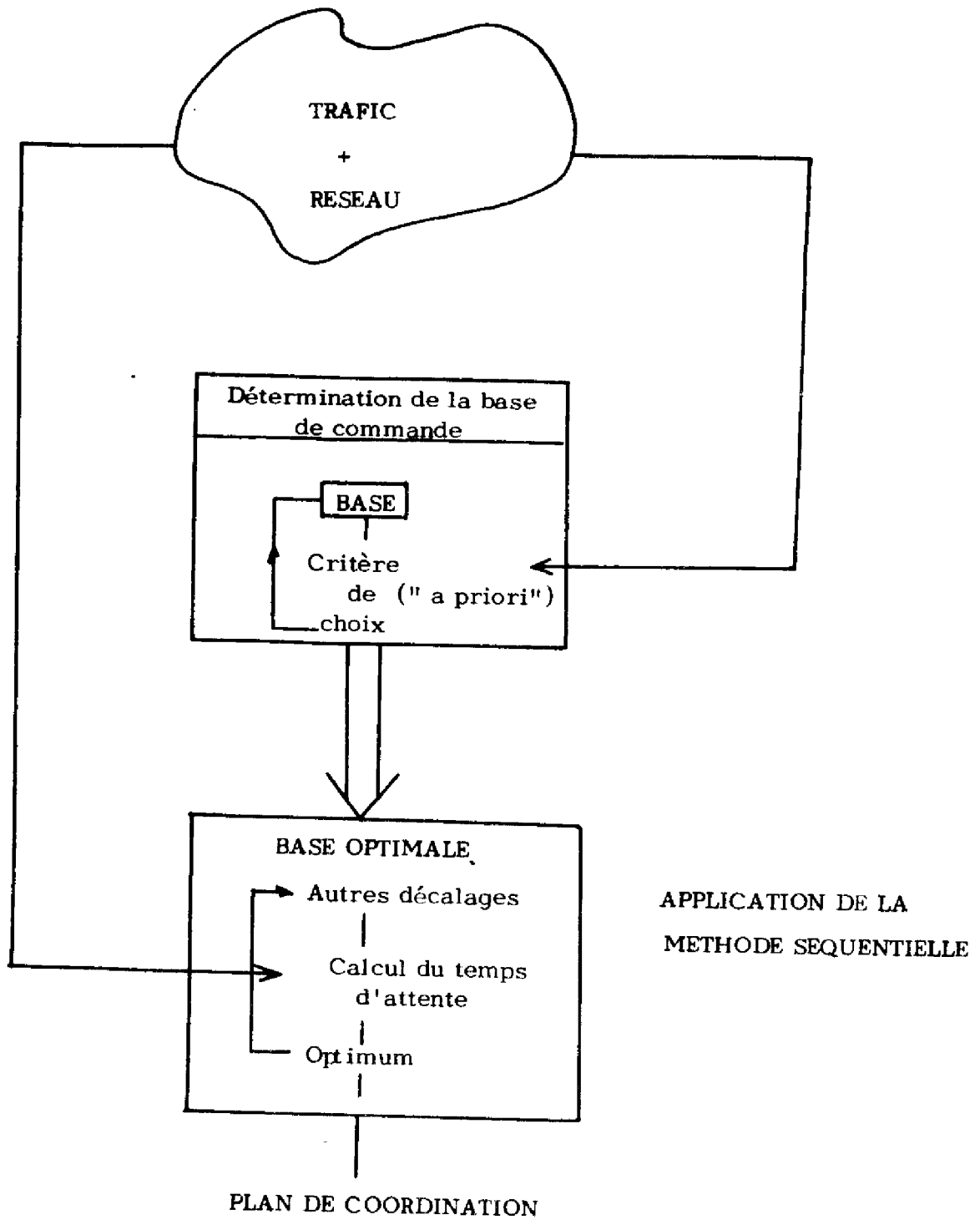
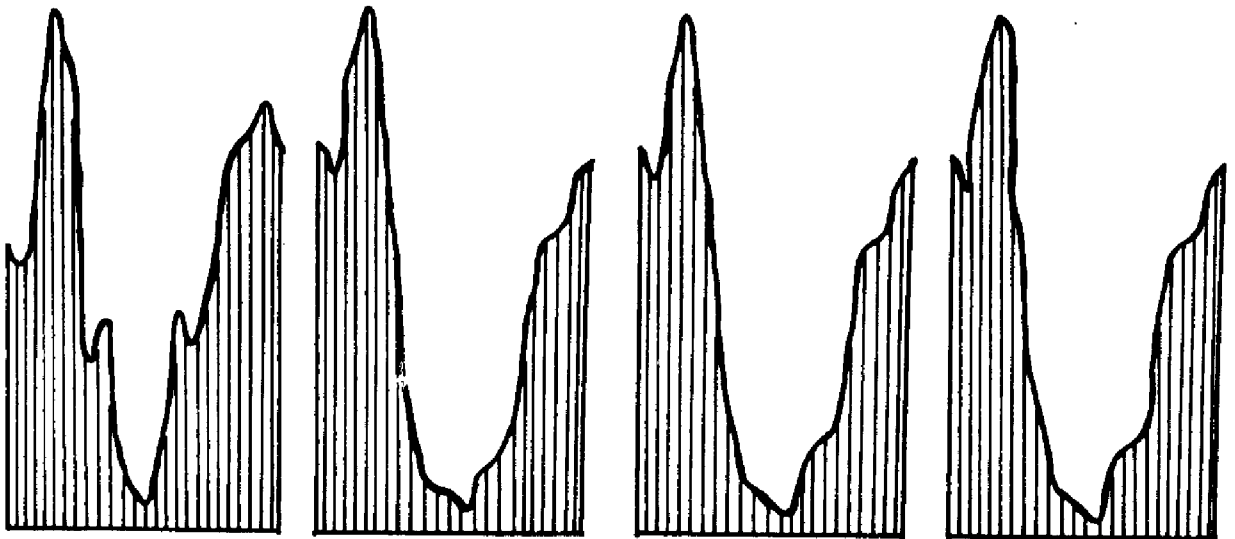


Figure 29 = Schéma-bloc de l'algorithme complet

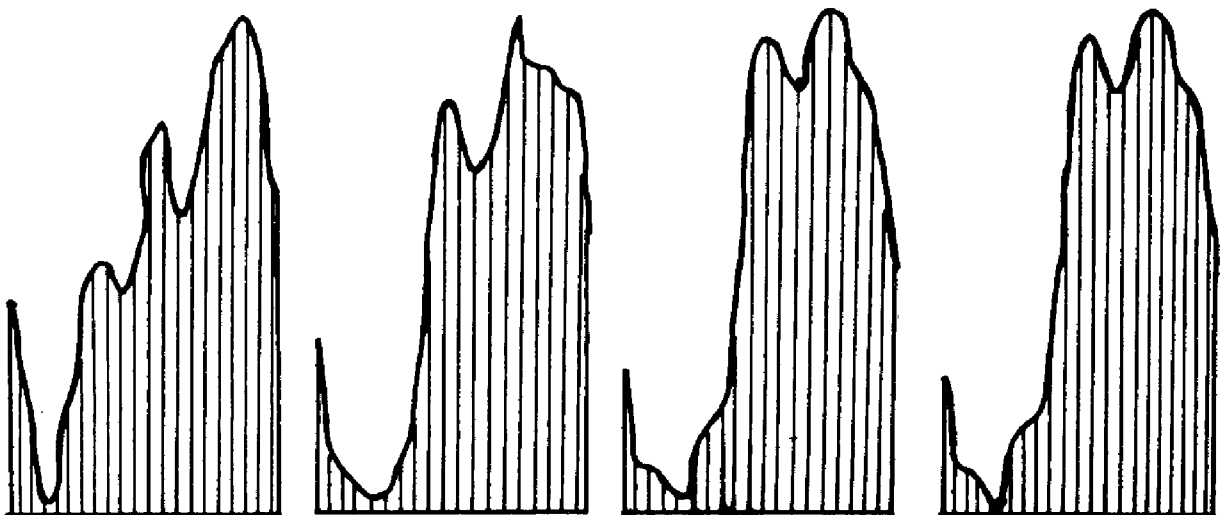
III. 2. d. 3) - Représentation graphique d'une optimisation complète  
par la méthode séquentielle modifiée

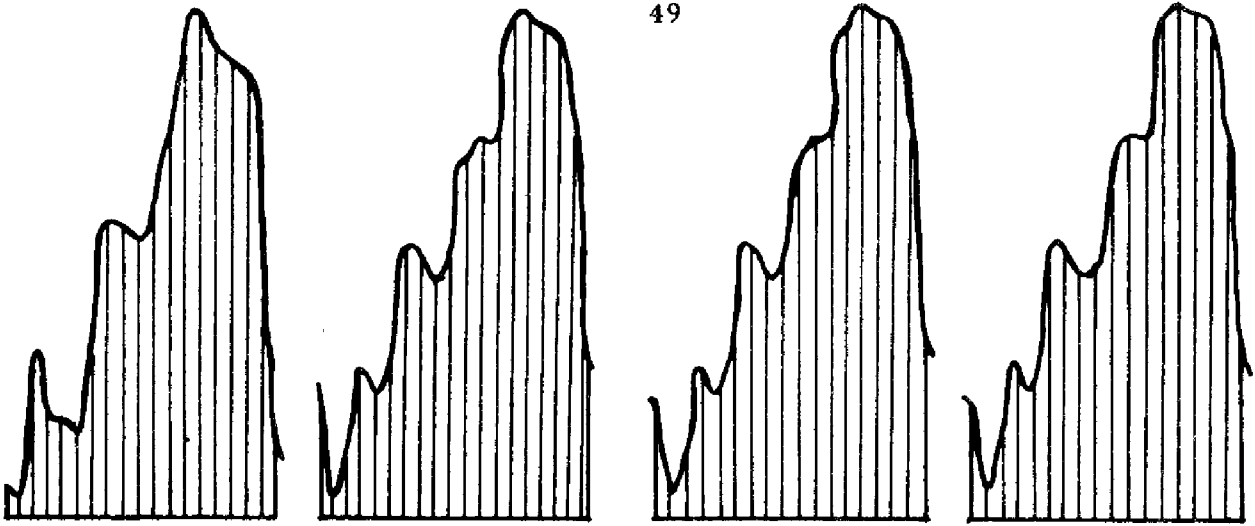
Toujours pour le réseau choisi pour test et avec des débits moyens sur toutes les branches, nous avons représenté les 7 séquences d'optimisation et leurs modifications au cours des itérations. La base d'optimisation étant, dans cet exemple, bien choisie, nous constatons que 3 itérations étaient suffisantes pour obtenir l'optimum.

$f(d_1)$  avec  $d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7 = \text{cste}$

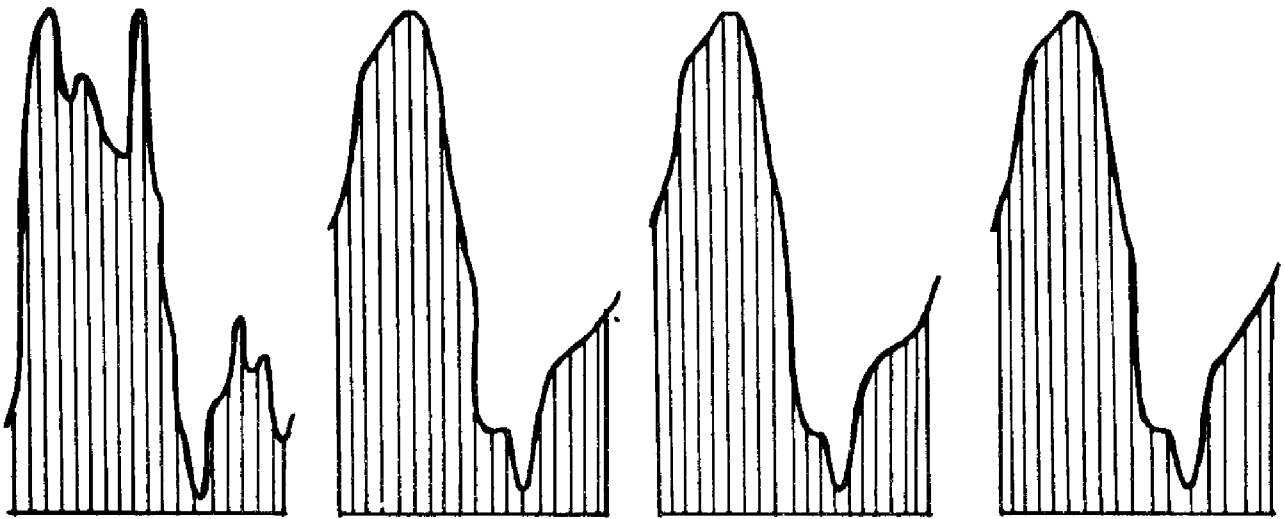


$f(d_2)$  avec  $d_1, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7 = \text{cste}$

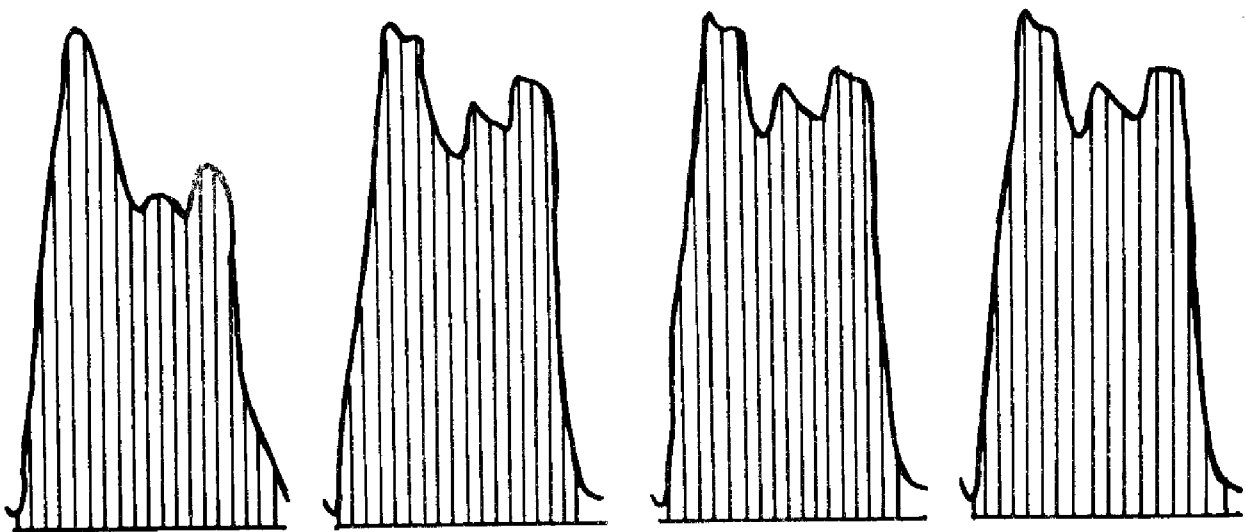




$f(d_3)$  avec  $d_1, d_2, d_4, d_5, d_6, d_7 = \text{cste}$

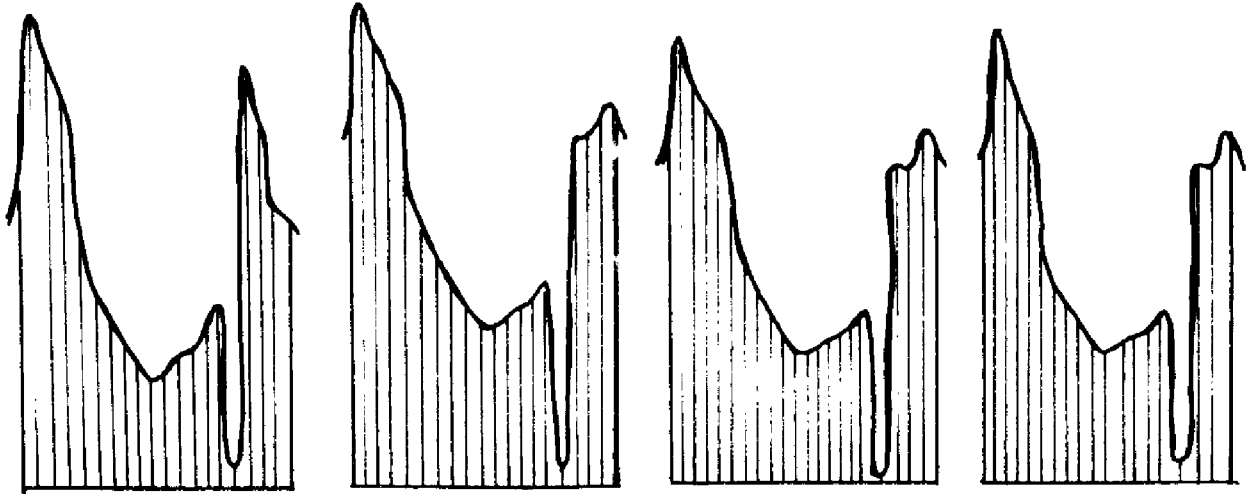


$f(d_4)$  avec  $d_1, d_2, d_3, d_5, d_6, d_7 = \text{cste}$

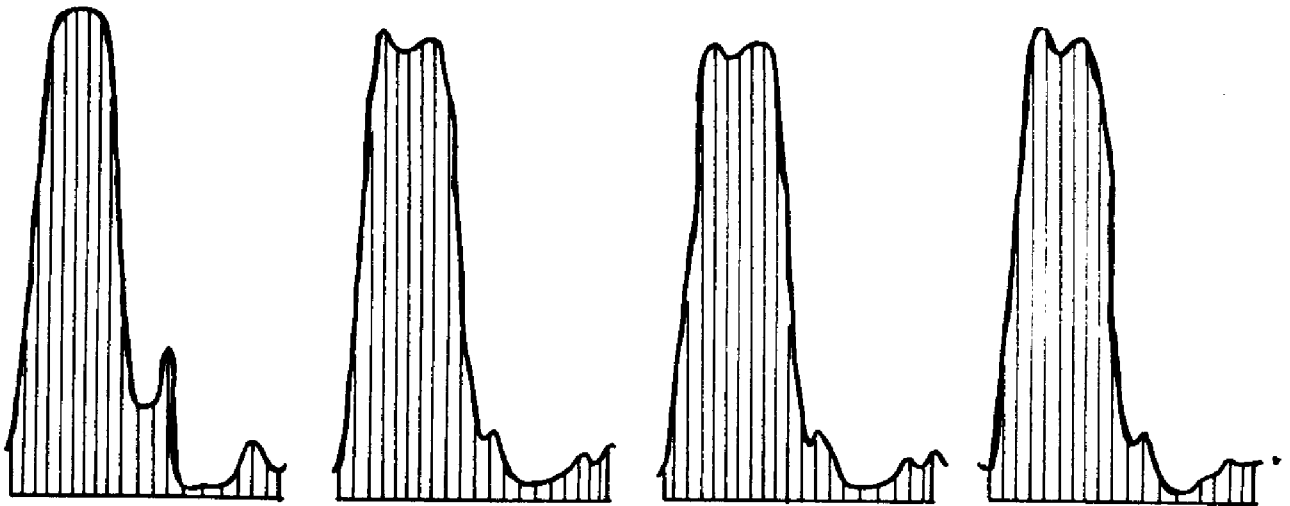


$f(d_5)$  avec  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_6, d_7 = \text{cste}$

$f(d_6)$  avec  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 = \text{cste.}$



$f(d_7)$  avec  $d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6 = \text{cste.}$



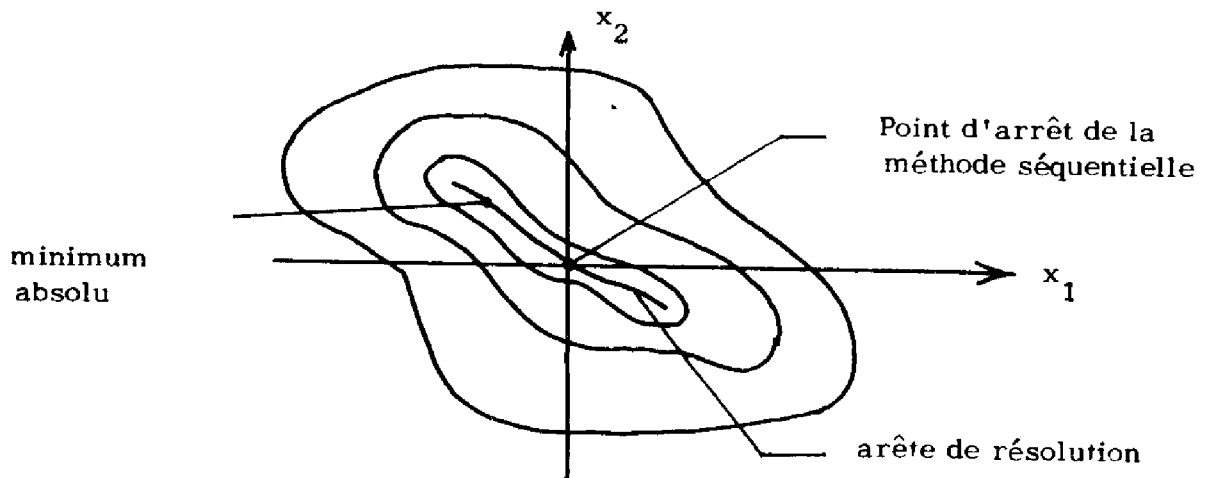
- Figure 30 -

Représentation graphique d'une optimisation complète par la méthode séquentielle modifiée.

### III.3. - Détermination de la base de commande en fonction de la configuration de Trafic.

#### III.3. a) - Influence des couplages entre tronçons sur les performances de la méthode séquentielle.

Nous avons choisi la méthode séquentielle parce qu'elle nous permettait, moyennant quelques modifications, d'obtenir une vision globale des sections de la surface de revenu. Cependant, cette méthode peut, dans certains cas, donner quand même de mauvais résultats. Ce phénomène se produit sur les arêtes de résolution.



- Figure 31 -

Exemple d'arête de résolution

De tels lieux sont fatals à la méthode séquentielle car alors, seule une rotation des axes permet de sortir de l'impasse. Dans les méthodes classiques, le vecteur de commande est recalculé chaque fois que l'algorithme piétine sur une arête de résolution (méthode de Rosenbrock).

Notons que ceci se produit seulement si le système a été "mal appréhendé" et si les directions d'exploration ne sont pas parallèles aux "directions principales" de la fonction à minimiser.

Autrement dit : Etant donné une fonction multivariable  $f(\underline{d})$ , nous savons qu'un vecteur de commande  $\underline{\delta}$  [nous supposons  $\underline{\delta} \subset \underline{d}$ ] donnera de bons résultats par l'application de la méthode séquentielle, si et seulement si la valeur du réglage  $\hat{\delta}_i$  optimum dans la direction  $i$  ne dépend que très peu du réglage des autres commandes. Le système est alors découplé c'est cette condition que nous devons chercher à satisfaire lors du choix du vecteur de commande de nos décalages. Nous voudrions montrer comment, en profitant de notre connaissance partielle du processus et de la forme particulière du critère temps d'attente donné par les modèles de trafic, nous avons pu appréhender ces directions de découplage maximum par des considérations a priori, validées par la suite, créant ainsi une méthode de choix du vecteur de commande.

### III. 3. b) - Notion de "Bloc de Trafic" associé à une variable de commande.

Rappelons que dans tous les modèles de trafic, le critère temps d'attente, reparté sur l'ensemble du réseau peut se mettre sous la forme :

$$f(\underline{d}) = \sum_{i=1}^b f_i(\underline{d})$$

$b$  = nombre de chaînons du réseau

$f_i$  = Temps d'attente dans le chaînon  $i$ .

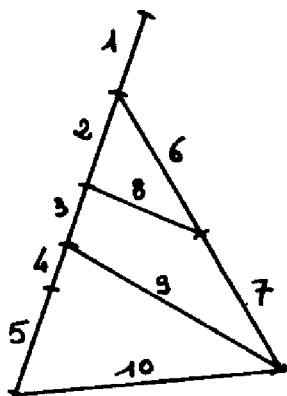
A chaque chaînon, portion du réseau joignant deux carrefours voisins, est associée une fonction élémentaire  $f_i(\underline{d})$  du critère. Dans la suite de cet exposé, nous allons essayer d'utiliser les propriétés de ces fonctions  $f_i(\underline{d})$  et de leurs sommes partielles.



Si le réseau est maillé, chaque variable de commande  $\delta_i$  va déterminer, à travers les relations de maille, les conditions d'écoulement des véhicules dans un certain sous-ensemble du réseau que nous appellerons : "Bloc de trafic associé à la variable  $\delta_i$ ".

Réciproquement, le traitement par la méthode séquentielle de chacun des "blocs de trafic" donnera le réglage optimal de sa commande.

Exemple : Reprenons le réseau choisi pour le test et numérotions chacun des chaînons.

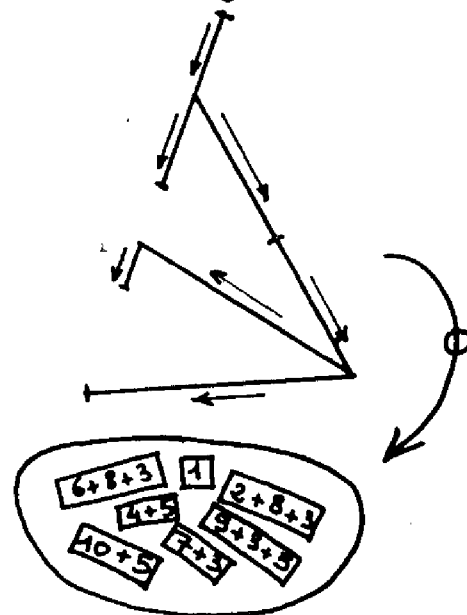
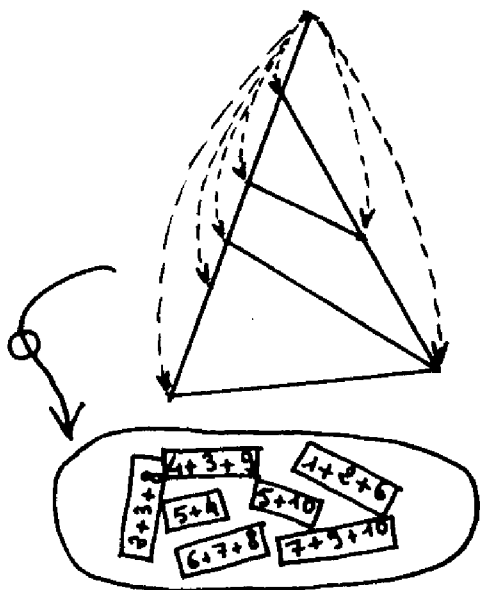


- Figure 32 - Réseau de Test.

nous choisirons pour ce réseau deux bases distinctes de commande.

1ère Base : Les décalages absolus

2ème Base : un ensemble de décalages relatifs.



Notation :  $\boxed{1+2}$  =  $f_1(d) + f_2(d)$

- Figure 33 - Exemples de Blocs de Trafic.

Nous voyons donc ainsi apparaître comment, à chaque base de commande est associé un ensemble de "Blocs de Trafic".

Or : - ce choix de la base de commande est à notre disposition  
- De plus, nous pouvons imposer l'ordre dans lequel nous allons traiter les décalages composant cette base.

Nous allons montrer que nous possédons là deux moyens d'agir sur le "découplage" de la fonction critère et nous essayerons d'apprécier, sur l'exemple précédent l'influence respective de ces deux choix.

Partant de cette étude, nous donnerons une méthode permettant de déterminer directement, à la seule vue de la configuration de trafic dans le réseau, une base convenable d'application de la méthode séquentielle.

### III. 3. c) - Etude des couplages dûs à la constitution des Blocs de Trafic.

Sur un réseau maillé, il est impossible, quelque soit la base, de disjoindre totalement les blocs de trafic. Et donc, il existe au moins un chaînon commun à deux blocs. Soit  $B_i$  et  $B_j$  ces blocs. Nous noterons :

$\delta_i$  le décalage "pilotant" le bloc  $B_i$  ( $\delta_i \in \text{Base}$ )

$\delta_j$  " " "  $B_j$  ( $\delta_j \in \text{Base}$ )

$d_{ij}$  le décalage du chaînon commun ( $d_{ij} \notin \text{Base}$ )

$f_{ij}(\underline{d})$  la fonction temps d'attente dans le chaînon commun.

$\varphi_i(\underline{d})$  " " du bloc  $B_i$

$\varphi_j(\underline{d})$  " " du bloc  $B_j$

Nous savons que  $\varphi_i$  et  $\varphi_j$  peuvent se mettre sous la forme

$$\begin{aligned} \varphi_i(\underline{d}) &= \beta_i(\underline{d}) + f_{ij}(\underline{d}) \\ \varphi_j(\underline{d}) &= \beta_j(\underline{d}) + f_{ij}(\underline{d}) \end{aligned}$$

De plus, du fait de l'existence des mailles, il existe deux relations linéaires

$$(1) \quad R_1(S_i, d_{ij}, \dots) = 0$$

$$(2) \quad R_2(S_j, d_{ij}, \dots) = 0$$

Supposons qu'au cours de l'application de la méthode séquentielle le bloc  $B_i$  soit traité avant le bloc  $B_j$ . La minimisation de la fonction

$$\begin{cases} \varphi_i(\underline{d}) = \beta_i(\underline{d}) + f_{ij}(\underline{d}) \\ R_1(S_i, d_{ij}, \dots) = 0 \end{cases}$$

nous fournira le réglage  $(\hat{\delta}_i)_n$ , valeur optimale provisoire trouvée pour  $\delta_i$  à la nième itération. Du fait de la relation (1), le décalage dans le chaînon commun vaut  $(\hat{d}_{ij})_n$ .

Au cours de l'optimisation du bloc suivant  $B_j$ , l'optimum obtenu  $(\hat{\delta}_j)_n$  peut, dans certains cas, être très différent de  $(\hat{\delta}_j)_{n-1}$ . De ce fait, l'existence de la relation linéaire  $R_2(\hat{\delta}_j, d_{ij}) = 0$  entraîne une grande variation de  $(\hat{d}_{ij})_n$ . Or ce décalage est la variable principale de la fonction  $f_{ij}(\underline{d})$  qui intervenait dans le calcul de  $(\hat{\delta}_i)_n$ . Si le "glissement" de la fonction  $f_{ij}(\underline{d})$  que nous venons d'expliquer, est, à lui seul, apte à déplacer le minimum global du bloc  $B_i$ , le réglage  $(\hat{\delta}_i)_n$  précédemment trouvé est, de ce fait, périmé. Ceci se produira d'autant plus que la différence entre la valeur maximum et la valeur minimum de la fonction commune  $f_{ij}(\underline{d})$ , que nous appellerons  $\Delta_{ij}$  (amplitude), sera importante.

Pour minimiser ce couplage, et donc nous rapprocher des directions idéales d'exploration du critère par la méthode séquentielle, nous devons donc chercher :

- à disjoindre le plus possible les blocs de Trafic
- à minimiser l'amplitude des fonctions qui, inévitablement seront communes à plusieurs blocs.

Pour cela, il nous a paru intéressant de prendre en considération, dans notre choix d'une base, la fonction.

$$\boxed{\sum_{\text{Hors Base}} \alpha_i \Delta_i}$$

avec  $\Delta_i$  = "amplitude" de la fonction  $f_i$  exclue de la Base

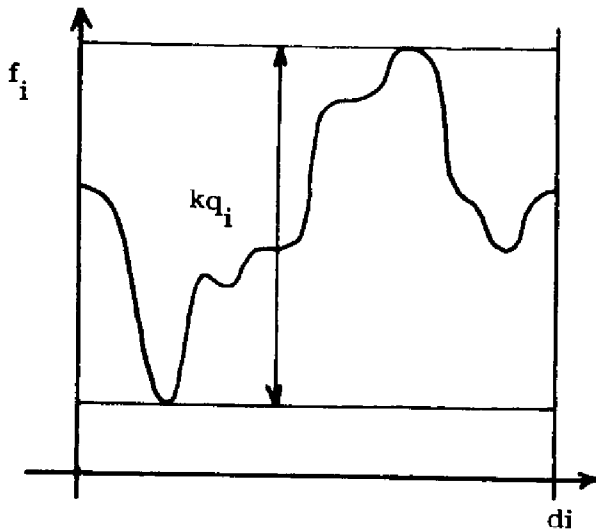
$\alpha_i$  = nombre de blocs de trafic dans lesquels la fonction  $f_i$  apparaît.

Compte tenu de l'analyse précédente du couplage, une fonction de ce type nous a paru significative pour mesurer la "qualité" d'une base d'optimisation mais une telle démarche étant purement arbitraire, nous nous devons de la justifier expérimentalement.

### III. 3. d) - Validation du critère de couplage et Détermination de la Base optimale.

Après avoir choisi un réseau maillé, une configuration de trafic et une base de commande des décalages, nous avons étudié la convergence de la méthode séquentielle à partir d'un grand nombre de conditions initiales ( $2^7$ ). La séquence d'optimisation était choisie arbitrairement ; nous montrerons, par la suite, que son influence est peu importante. Nous estimons que, dans ces conditions, la valeur moyenne du critère obtenu ne dépend plus du choix des conditions initiales mais est seulement l'image de la qualité de la base de commande choisie. Cette valeur moyenne sera, pour nous, la vraie mesure de cette qualité.

Ce travail a été réalisé sur une quinzaine de "bases tests" prises au hasard. Parallèlement, pour chacune de ces bases, nous avons calculé les valeurs du critère de couplage  $\sum \alpha_i \Delta_i$ . Pour cela, comme il est délicat de connaître la valeur des amplitudes, nous avons utilisé une particularité du processus trafic



- Figure 35 -

Un exemple type de fonction  $f_i(d_i)$

à savoir que l'amplitude d'une fonction  $f_i(d)$  est proportionnelle au débit dans le tronçon  $i$ ,  $q_i$ .

Le critère de couplage prend alors la forme :

$$\sum \alpha_i q_i$$

sur tous les chaînons n'appartenant pas à la base.

avec :

$\alpha_i$  = ordre de multiplicité  
 $q_i$  = débit dans le chaînon.  
*i*

Moyennant cette approximation, nous avons ainsi pu calculer la valeur du critère de couplage pour chacune des bases

tests. Notre souci a été ensuite de valider ce critère et pour cela, nous avons comparé le classement des bases.

- d'une part d'après les valeurs du critère de couplage.
- d'autre part, d'après le critère absolu de qualité (moyenne des critères optimum à partir des  $2^7$  conditions initiales)

Nous présentons ci-après un tableau des valeurs obtenues ainsi qu'une description des différentes bases tests.

Le coefficient de corrélation linéaire entre le critère absolu et le critère  $\sum \alpha_i q_i$  vaut :

Hors Base	<u>Coef. corrélation = 0.82</u>
--------------	---------------------------------

La corrélation est donc forte et,

les deux critères varient dans le même sens. Ce critère  $\sum \alpha_i q_i$  nous semble donc convenir : il nous permet de choisir une base favorable à l'application de la méthode séquentielle.

### III.3. e). - Détermination de la base optimale par l'algorithme de J.P. CHAR

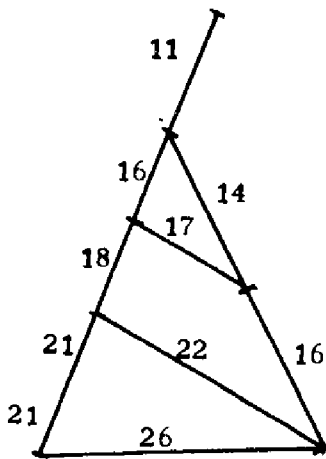
Il est à remarquer que le concept de "Base de commande" correspond à celui d'"arbre" dans la théorie des graphes. De ce fait, le critère de décision étant acquis, nous pouvons poser le problème de la détermination de la base en ces termes :

Etant donné un réseau maillé, quel est l'arbre de ce graphe minimisant le critère

$\sum \alpha_i q_i$  précédemment défini,  
hors arbre étant entendu que chaque

branche du graphe sera affectée d'un coefficient  $q_i$ .

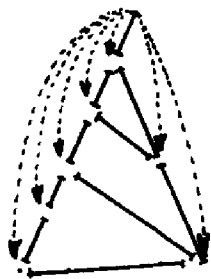
Pour résoudre ce problème, nous n'avons pas développé de méthode directe d'investigation et nous nous sommes contentés de générer par l'algorithme énumératif de de J.P. CHAR (référence 11) tous les arbres possibles du réseau en évaluant le critère pour chacun d'eux.



- Figure 37 -

Réseau Test et valeurs des débits.

Un tel balayage systématique nous donne évidemment la meilleure des bases mais cet algorithme devient vite très long car le nombre des arbres

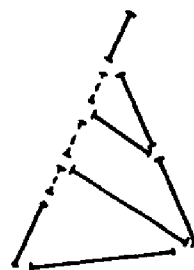


Décalages absolus



Base KMAX

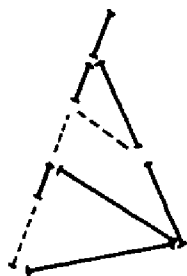
58



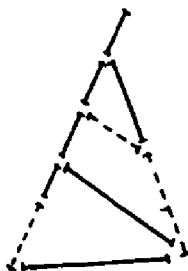
Base TEST



Base KMIN



Base 1



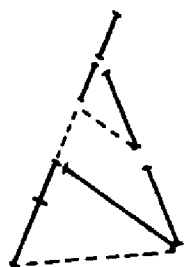
Base 2



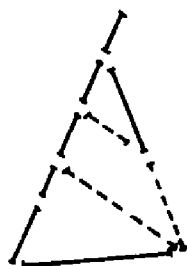
Base 3



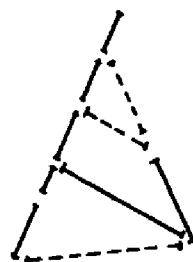
Base 4



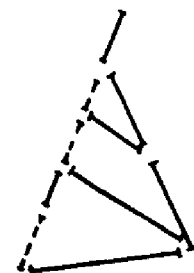
Base 5



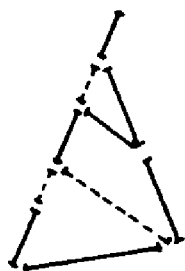
Base 6



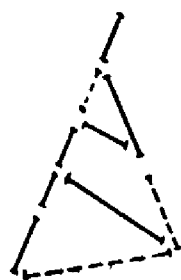
Base 7



Base 8



Base 9



Base 10



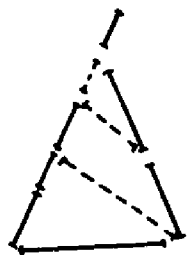
Base 11



Base 12



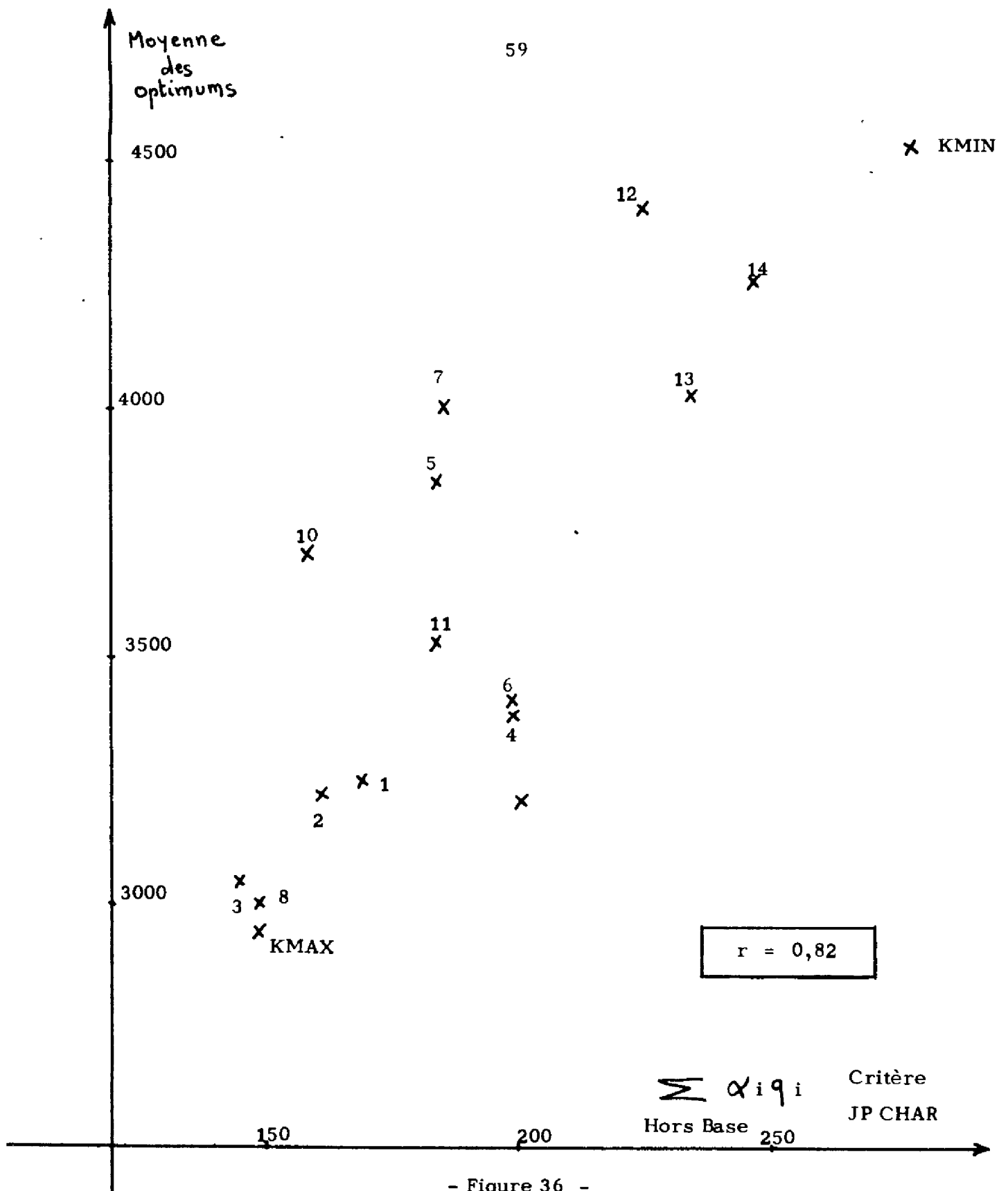
Base 13



Base 14

- Figure 34 -

Description des Bases choisies pour  
notre étude comparative



- Figure 36 -

ETUDE DE LA CORRELATION ENTRE LA MOYENNE DES OPTIMUMS ET LE CRITERE DE J.P. CHAR

croît très vite avec la complexité du réseau.

Pour cette raison, dans le but de pouvoir aborder des réseaux importants, nous aurons intérêt à modifier légèrement le critère de décision de façon à donner le jour à une procédure plus simple de recherche de la base optimale.

III. 3. f) - Dégradation du critère pour l'application de l'algorithme de KRUSKAL.

Si, au lieu du critère  $\sum_{\text{Hors Base}} \alpha_i q_i$ , nous adoptons le critère simplifié  $\sum_{\text{Hors Base}} q_i$ , ce qui revient à négliger l'ordre de multiplicité, notre

problème se ramène à un problème classique de la théorie des graphes : le problème de l'arbre maximum ; "Etant donné le réseau et un coût affecté à chaque branche, déterminer l'arbre ayant la somme des coûts maximum" (la somme des coûts hors arbre est bien alors minimum).

Une solution très simple de ce problème a été donnée par KRUSKAL. Son algorithme s'énonce ainsi : "Parmi les branches qui ne font pas encore partie de l'arbre, choisir la branche ayant le plus grand coût et qui ne forme pas un cycle avec les branches déjà prises". La méthode s'avère donc très simple mais il nous reste à vérifier que malgré la dégradation, le critère  $\sum_{\text{Hors Base}} q_i$  est encore significatif

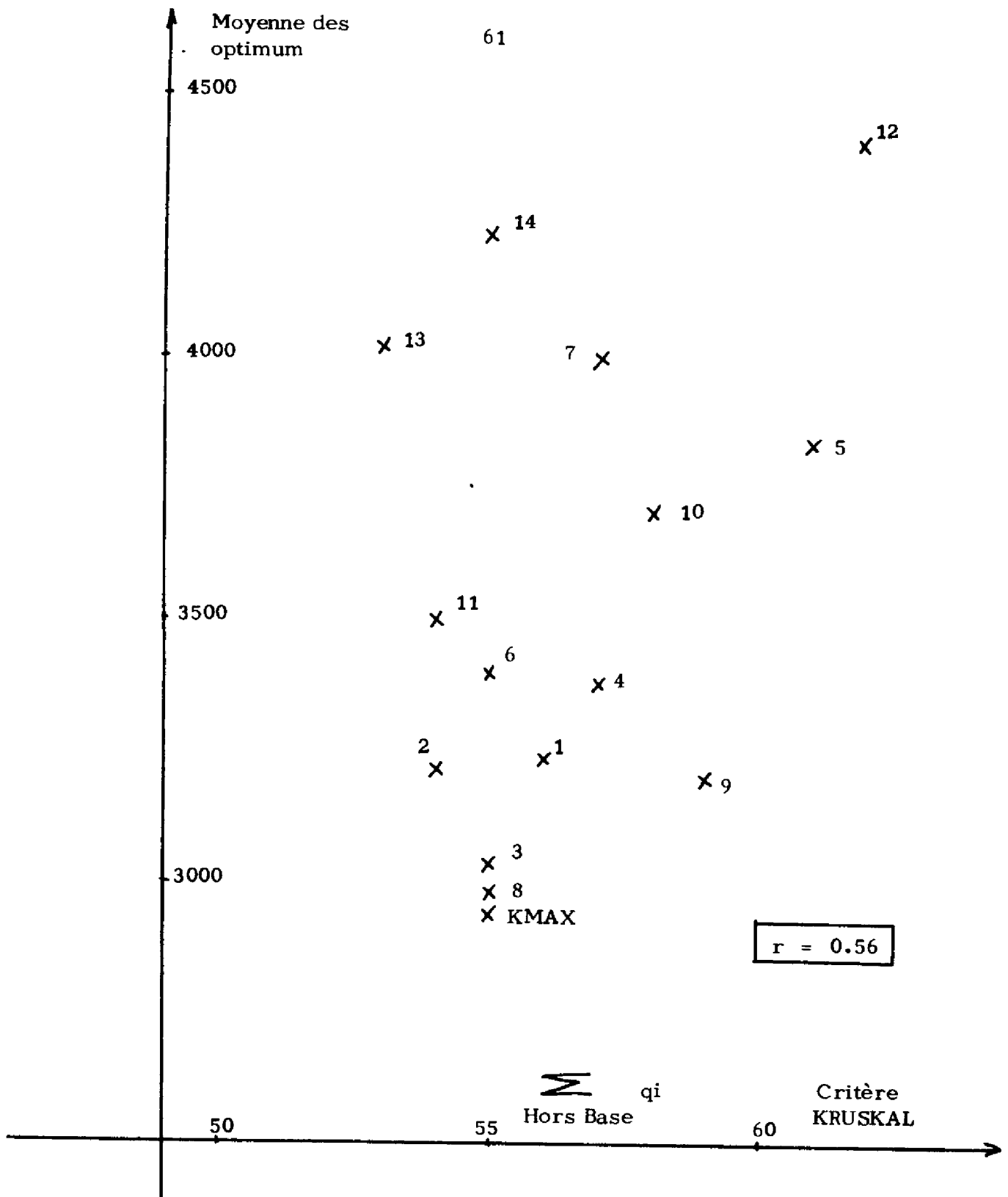
c'est à dire qu'il est suffisamment corrélié avec le critère absolu de qualité.

L'étude, réalisée sur le même ensemble de bases testées nous montre un coefficient de corrélation de 0.56.

Le critère  $\sum_{\text{Hors Base}} q_i$  est donc moins significatif que le critère  $\sum_{\text{Hors Base}} \alpha_i q_i$  ce qui

est naturel car il ne fait pas intervenir les ordres de multiplicité c'est-à-dire la structure géométrique du réseau. Néanmoins il a l'avantage de se prêter à une méthode très simple d'optimisation, bien connue dans la théorie des graphes : l'algorithme de KRUSKAL. Nous sommes cependant très loin de l'optimalité.





- Figure 39 -

ETUDE DE LA CORRELATION ENTRE LA MOYENNE  
DES OPTIMUMS ET LE CRITERE DE KRUSKAL

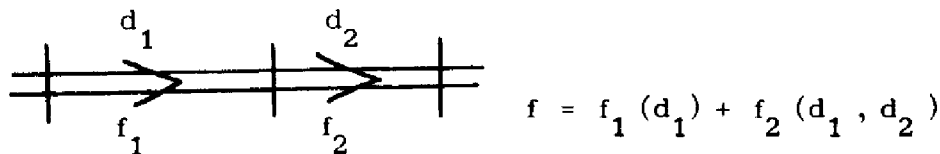
**RESULTATS DE L'ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTS  
CRITERES DE CHOIX D'UNE BASE DE COMMANDE**

BASE	Moyenne des critères optimum	Critère de J.P. CHAR $\sum \alpha_i \cdot q_i$	Critère de KRUSKAL $\sum q_i$
1	3.242	169	56
2	3.212	161	54
3	3.032	145	55
4	3.378	199	57
5	3.842	184	61
6	3.394	196	55
7	4.005	185	57
8	2.999	149	55
9	3.192	203	59
10	3.701	158	58
11	3.513	184	54
12	4.403	224	62
13	4.019	235	53
14	4.244	247	55
KMAX	2.937	149	55
KMIN	4.517	278	65
Décalages absolus	3.239		

III. 3. g) - Influence de l'ordre des "blocs" dans l'application de la méthode séquentielle.

Nous possédons maintenant les moyens de minimiser les effets du couplage dû à la constitution des blocs de trafic. Nous savons donc maintenant, à partir d'un réseau quelconque donné, générer le vecteur de commande le plus adéquat ; de cet ensemble non ordonné nous devons encore faire une séquence et nous voudrions montrer qu'il y a là, dans certains cas, un moyen d'accélérer la convergence de la méthode séquentielle.

L'exemple le plus simple que nous puissions prendre pour expliquer certains couplages orientés est celui de deux tronçons adjacents dans une artère à sens unique. Dans ce cas particulier extrême, les blocs de trafic  $B_1$  et  $B_2$  se réduisent à un seul tronçon et, de plus, la fonction  $f_1$  est monovariable.



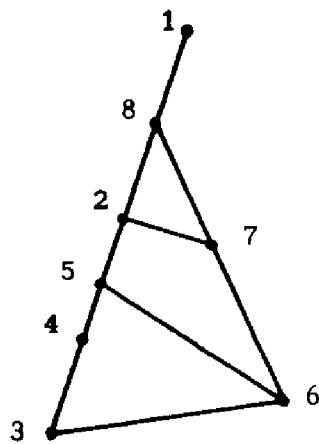
Il y a donc intérêt ici, à traiter  $B_1$  en premier, figeant ainsi tout de suite le  $\hat{d}_1$  optimal. Sur cet exemple, le "bloc de trafic"  $d_1$  n'est "receveur" d'aucun autre écoulement par contre  $B_2$  est à la fois "donneur" et "receveur". De façon plus générale, sur un réseau quelconque, il peut se dégager qu'un bloc de trafic est "plutôt donneur" alors qu'un autre est "plutôt receveur". Lorsque de telles tendances apparaissent, il faut les utiliser : ce sont des informations sur le processus qui facilitent son optimisation.

Sur le réseau test que nous avons étudié, de tels déséquilibres n'apparaissent pas. C'est la raison pour laquelle nous n'avons pu, sur ce cas, conclure de façon définitive. Nous avons cependant essayé de dégager une méthode générale de construction de la séquence optimale. Pour cela, après avoir choisi une base de commande, nous avons envisagé 14 séquences différentes ( parmi les 7! possibles ) . Pour chacune de ces séquences, nous avons calculé le réglage

moyen et le critère moyen obtenus à partir d'un grand nombre de conditions initiales (pour nous affranchir de cette difficulté). Ces différentes séquences avaient été choisies d'après des considérations à priori (donneurs décroissants, débits décroissants, amplitudes décroissantes, etc....). Aucun résultat concluant n'a pu être obtenu, du fait de l'homogénéité de la charge du réseau. Nous avons seulement montré que l'influence de l'ordre d'optimisation est beaucoup plus faible que l'influence de la constitution du vecteur de commande mais nous n'avons pu proposer une méthode de construction de la séquence optimale dans le cas d'un réseau uniformément chargé.

III. 3. h) - Utilisation de la méthode séquentielle proposée avec le modèle TRANSYT.

Lors du développement de notre méthode du choix de la base optimale, nous avons à certains moments émis des hypothèses sur les propriétés des couplages entre chaîons à l'intérieur d'un réseau maillé. Nous avons à ces moments là souligné que ces propriétés n'étaient pas spécifiques du modèle adopté mais caractérisaient le comportement de tous les modèles à écoulement par bandes. Notre méthode du choix de la base optimale de commande reste donc applicable à tous ces modèles, c'est ce que nous avons voulu vérifier en l'appliquant à TRANSYT, tout en conservant le réseau adapté pour l'étude précédente.



RESEAU TEST

N <sup>o</sup> du chaînon	Débits
i	q <sub>i</sub>
1-8	1000
2-8	1000
2-5	152
4-5	1000
3-4	1000
3-6	1000
5-6	848
2-7	800
6-7	1000
7-8	1000

- Figure 40 -

Réseau Test et débits le parcourant

N° de la Base	$\sum \alpha_i \cdot q_i$	N° de la Base	$\sum \alpha_i \cdot q_i$
1	5208	22	9544
2	5456	23	12544 M
3	10992	24	8600
4	9544	25	8000
5	8600	26	9400
6	8000	27	9400
7	9400	28	9400
8	5208	29	12544 M
9	5456	30	9400
10	* 5056	31	5456
11	5304	32	9544
12	10992	33	8000
13	9544	34	5456
14	8600	35	5304
15	8000	36	9544
16	9400	37	8000
17	5208	38	5456
18	5456	39	9544
19	10992	40	9544
20	9544	41	8000
21	10144		

- Figure 41 -

CALCUL DU CRITERE  $\sum \alpha_i q_i$  POUR LES 41 BASES POSSIBLES DU RESEAU

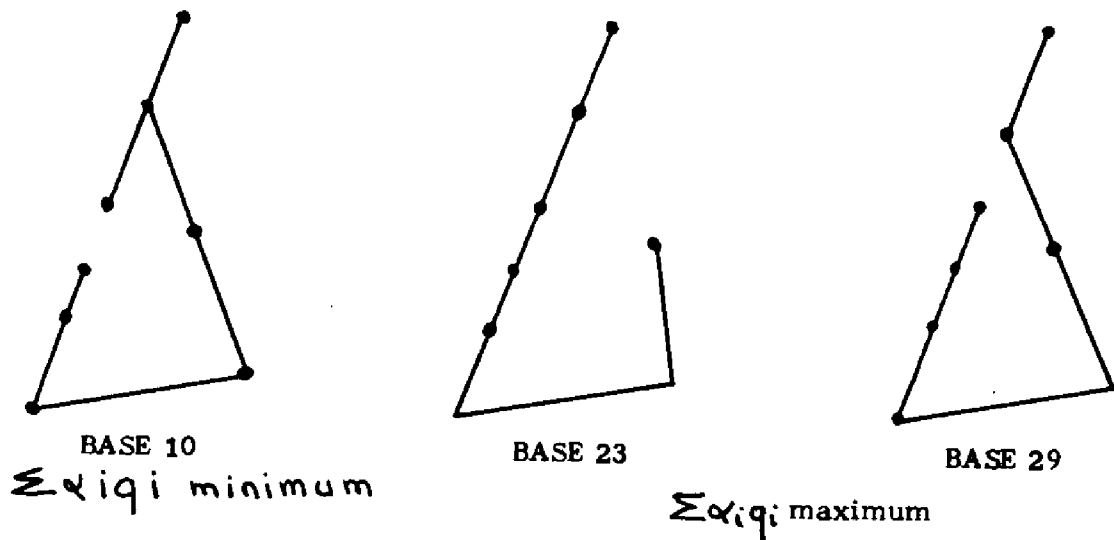


Figure 42 = Bases retenues pour la comparaison

Nous renvoyons au chapitre précédent pour la détermination de la base optimale. Nous présenterons seulement le tableau donnant le critère ~~qui~~  $q_i$  pour chacune des bases du réseau. Ce travail nous a permis de retenir la base 10 comme étant "optimale" et les deux bases 23 et 29 comme devant donner de mauvais résultats par l'application de la méthode séquentielle. De façon à vérifier ces résultats, nous avons donc effectué une optimisation des décalages sur chacune de ces trois bases en notant le critère à la fin de chaque itération de manière à pouvoir analyser la convergence de l'algorithme. Les résultats obtenus sont les suivants :

CRITERE INITIAL = 91.48 Veh. s/s

	BASE 10 "Optimale"	BASE 23	BASE 29
FIN 1° Itérat.	64.98	70.88	68.72
FIN 2° Itérat.	62.44	64.89	64.42
FIN 3° Itérat.	62.42	64.85	62.71
FIN 4° Itérat.	62.42	64.85	62.71

- Figure 43 -

**VALEURS DU CRITERE A LA FIN DE CHAQUE ITERATION POUR  
CHACUNE DES BASES ETUDIES**

Ils confirment donc bien que la base 10 choisie apporte une convergence plus rapide que les deux autres ; cependant, si l'on effectue plus de deux itérations, cet avantage disparaît et les performances obtenues sont sensiblement égales quelle que soit la base.

L'ordre de traitement des décalages à l'intérieur d'une base semble également être un facteur influent mais nous n'avons pu déterminer exactement quel était l'ordre optimum.

Au cours de ce travail, nous avons eu l'occasion de comparer la méthode séquentielle et la méthode du gradient (qui est appliquée dans la version originale de TRANSYT). Il s'est avéré que ces deux méthodes détectaient dans

presque tous les cas les mêmes minima et que la méthode du gradient nécessitait beaucoup moins de simulations. Cette méthode d'exploration locale semble donc être mieux adaptée aux propriétés du modèle TRANSYT. Elle avait cependant donné de mauvais résultats sur le modèle numérique présenté plus haut, à cause de la présence des minima locaux.

La conclusion de ce travail est donc que si la méthode de choix de la base de commande dépend peu du modèle de simulation, il en est différemment pour la méthode d'optimisation qui se doit d'utiliser au mieux les propriétés de chacun des modèles. Dans cet ensemble d'algorithmes possibles, la méthode séquentielle que nous avons adoptée nous semble être l'outil d'optimisation le plus apte à traiter les modèles de simulation très contrastés dont les surfaces de critère sont généralement très tourmentées.

-----



DEUXIEME PARTIE

---

CONCEPTION - ETUDE ET MISE EN PLACE, SUR UN PETIT  
CALCULATEUR, D'UNE COMMANDE PREDICTIVE ET ADAPTATIVE  
DES FEUX DE TRAFIC D'UNE ZONE URBAINE.

---



## INTRODUCTION

La première partie de ce mémoire a été consacrée à la présentation des travaux que nous avons menés en vue de la conception et de la réalisation d'une commande en temps réel agissant sur les feux de trafic par l'entremise de variables d'action qui étaient : les cycles, les splits et les décalages. Ce type de commande étant actuellement le plus répandu, nous conviendrons de le désigner par le terme de "commande classique".

Cette première direction de recherche nous a permis de mettre en évidence un certain nombre d'insuffisances d'une telle commande. Nous allons essayer de les souligner.

### HYPOTHESE DE L'EXISTENCE D'UN REGIME PERMANENT.

Définir une commande classique revient à déterminer la valeur de chacune des variables d'action, en particulier des décalages, et pour cela, quel que soit le modèle d'optimisation adopté, nous devons inévitablement faire l'hypothèse de l'existence d'un régime permanent, ce qui veut dire que nous allons prévoir sur un horizon de plusieurs cycles des événements qui sont en réalité imprévisibles à aussi long terme. Au stade actuel de notre connaissance du "phénomène Trafic urbain", il nous semble, en effet, que l'horizon raisonnable de prédiction est de l'ordre de quelques minutes. Au-delà de cette limite, la probabilité des événements devient vraiment trop faible pour être significative.

De plus, la complexité du problème théorique est telle qu'elle nous oblige à adopter des modèles d'optimisation qui noient dans une représentation macroscopique un ensemble d'événements microscopiques éphémères et fugitifs pour n'en retenir, à la fin, qu'une valeur moyenne peu significative et déjà périmée. Nous ferons donc grief aux commandes classiques de l'audace de leurs hypothèses et de leurs "lissages" des phénomènes microscopiques sur lesquels elles renoncent à agir.

### GESTION DES TRANSITOIRES.

Une autre remarque concerne la dépendance des variables d'action. Si, en régime statique, les trois paramètres de réglage des feux du réseau ( cycle, split, décalage ) sont indépendants, en régime dynamique il en est autrement et toute modification de l'une des variables ne peut se faire que par "rattrapage" au détriment de l'une au moins des deux autres. D'où les nombreux problèmes de gestion des transitoires, en particulier aux changements de plans de coordination, qui restent d'ailleurs pour la plupart non résolus.

### REGIMES SATURES.

En saturation, le contrôle et la maîtrise des débits deviennent primordiaux et, même si les stratégies de commande pour de tels régimes sont assez mal définies pour l'instant, il apparaît cependant déjà que la commande classique n'offrira pas à l'organe de décision les bons outils d'intervention.

### VEHICULES PRIORITAIRES

Enfin, il semble très difficile d'inclure dans une telle commande macroscopique des véhicules prioritaires (en particulier les transports en commun) autrement que sous forme de perturbations inévitables (prolongements de verts arbitraires, etc...) que le système ne peut contrôler.

### APPARITION DE NOUVELLES STRATEGIES DE CONTROLE.

Pour essayer de remédier aux limitations de la commande classique exposées ci-dessus, de nombreux algorithmes ont été conçus et appliqués. Sans prétendre fournir une liste complète de toutes ces méthodes, il est cependant possible de distinguer deux grandes classes. Pour chacune d'elles, nous donnerons quelques exemples types, d'origine anglo-saxonne (Réf. 3).

#### • Systèmes coordonnés avec réponse au trafic local.

Ces techniques utilisent généralement un plan de coordination sous-jacent

calculé par une méthode off-line classique et des capteurs pour l'adaptation locale. Nous citerons :

- Flexiproq : Lorsque le trafic est continu, c'est le plan de base qui est appliqué. Par contre, en trafic fluide, il y a adaptation locale et certaines phases peuvent même être supprimées s'il n'y a pas de demande.
- Equisat : Dans ce système, les durées de cycle et l'ordre d'enchaînement des phases sont fixes. Les décalages entre milieux de vert sont déterminés par le plan de base. Des variations de durées de vert sont alors permises de façon à égaliser les taux moyens de saturation des différentes phases.

• Systemes entièrement adaptatifs.

Dans ces systèmes, toutes les commutations de feu sont calculées en ligne à partir des informations délivrées par des capteurs.

Nous citerons :

- Dynamic Plan Generation. Les débits fournis par les capteurs sont utilisés pour calculer les durées de cycle et les splits suivant les principes donnés par WEBSTER et COBBE. Les décalages sont utilisés pour minimiser le temps d'attente ou le nombre d'arrêts en utilisant des vitesses mesurées ou estimées et un modèle simple d'écoulement des véhicules dans le réseau. La durée du cycle, les splits et les décalages sont calculés tous les trois cycles environ.
- PLIDENT : Ce système n'a aucun cycle imposé. Le déplacement des pelotons dans le réseau est identifié et l'algorithme en prévoyant leurs instants d'arrivée, tente de gérer les feux de façon à ne pas les arrêter sur les voies prioritaires.

C'est dans cette catégorie des systèmes entièrement adaptatifs que l'on peut ranger la classe des systèmes à cycle libre avec un modèle en ligne. Les possibilités de ce type de commande semblent être très grandes ; cependant, les problèmes techniques et informatiques soulevés sont plus importants que dans les autres types de commande.

C'est d'ailleurs la raison pour laquelle il existe à ce jour peu de systèmes fonctionnant sur ce principe. Signalons cependant les travaux de A.J. MILLER (Réf. 15) qui, dès 1963, avait développé un type de commande adaptatif et prédictif basé sur le calcul, toutes les deux secondes, d'une expression algébrique permettant de décider du maintien ou du basculement du feu. Ce travail avait donné de bons résultats pour un carrefour isolé mais on ne peut pas parler pour A.J. MILLER de l'existence d'un modèle de simulation en ligne.

C'est donc un travail devant permettre la mise en place d'une commande adaptative et prédictive avec modèle en ligne que nous avons cherché à réaliser parce que, malgré ses difficultés, c'est cette voie qui nous a semblé, après l'analyse précédente, être la plus apte à traiter les problèmes laissés en suspens par la commande classique.

#### ADOPTION D'UNE COMMANDE AVEC MODELE EN LIGNE

Nous avons donc mis au point et développé une gestion des feux par action sur l'instant de fin de vert de chaque phase.

Il n'y a alors plus qu'une seule variable d'action : l'heure de commutation du feu. En contrepartie, l'organe de commande est sollicité beaucoup plus souvent et sa décision, si elle est élémentaire (basculement au report), doit cependant tenir compte de plusieurs facteurs : évacuation complète de la queue, synchronisation avec les phases amont et aval, etc... Cette décision devra donc s'appuyer sur un modèle de simulation relativement fin et complet.

Cet accroissement de la fréquence d'intervention de l'organe de décision, doublé

d'une "microscopisation" de l'analyse du processus et d'une augmentation de la collecte des données va évidemment dans le sens d'un alourdissement du cahier des charges de l'organe de commande. De ce fait, un petit calculateur de contrôle de processus (en l'occurrence un C.I.I. 10.010 de 12 K octets) était-il suffisamment puissant pour assumer toutes ces fonctions ? L'un des objectifs du travail que nous présentons dans cette deuxième partie a été d'apporter une réponse à cette question et de déterminer une organisation interne du calculateur permettant d'aboutir à une telle commande des feux opérationnelle en temps réel.

Après avoir prouvé la réalisabilité de cette commande, notre objectif a été de mesurer l'efficacité de son application sur un certain nombre de configurations de trafic.

---





## CHAPITRE I

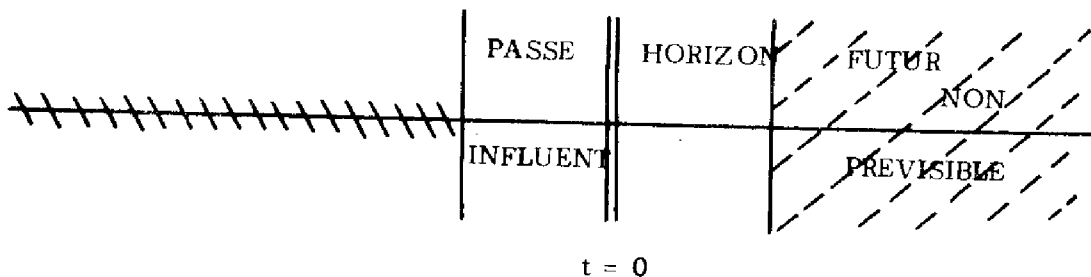
### ASPECT PREDICTIF ET PRINCIPE DE LA COMMANDE

#### PAR COMMUTATION DU VERT

I.1.) - Une caractéristique du processus trafic est d'être sujet à des fluctuations importantes et brèves. Devant ce fait, la commande classique, maladroite en régime dynamique, renonce à suivre toutes les variations du trafic et se contente, d'imposer, pendant quelques fois plusieurs minutes, au trafic présent, une régulation calculée pour convenir à une situation passée.

Le seul moyen d'échapper à ce "retard pur" était de donner à notre commande un aspect prédictif : voici comment nous avons abordé ce problème.

Si nous représentons sur l'axe des temps l'instant présent, il nous a paru intéressant de mettre en évidence les quatre zones indiquées sur le schéma.



- Figure 44 -

Cette partition du temps en quatre régions est justifiée à nos yeux par le fait que :

- Les phénomènes qui se sont déroulés pendant le passé révolu influent très peu sur l'écoulement actuel : ces événements sont donc considérés comme périmés et leur connaissance n'est pas indispensable.

- . Le passé influent, par contre, est la période pendant laquelle ont pris naissance les conditions de trafic qui nous permettront la prédiction de l'écoulement futur. Les événements de cette période devront donc être soigneusement mémorisés et mis à la disposition d'un modèle de prédiction du trafic.
- . Ce modèle, qui reste à préciser, sera alors capable de nous fournir des informations sur le futur prévisible mais, quel que soit sa puissance, il sera de toute façon impossible de prévoir au-delà d'une certaine limite appelée Horizon, borne inférieure de la quatrième zone.

## 1.2. - PRINCIPE DE LA COMMANDE.

Le principe de base de notre commande est d'évaluer les conséquences que fait subir à une configuration de trafic estimée, l'application d'une politique locale de régulation.

Ceci suppose donc que nous sommes capables à chaque instant :

- d'estimer le trafic futur à partir de l'observation du trafic passé, d'où la nécessité d'un modèle de prédiction du trafic à court terme.
- A défaut de pouvoir les déterminer par un plan de coordination global, de connaître l'état de chacun des feux avoisinants. D'où la nécessité d'un modèle de prédiction des feux.
- de calculer un critère de qualité qui nous permettra de retenir la meilleure politique parmi l'ensemble proposé d'où la nécessité d'un modèle de décision.

Nous allons consacrer un paragraphe à chacun de ces problèmes.

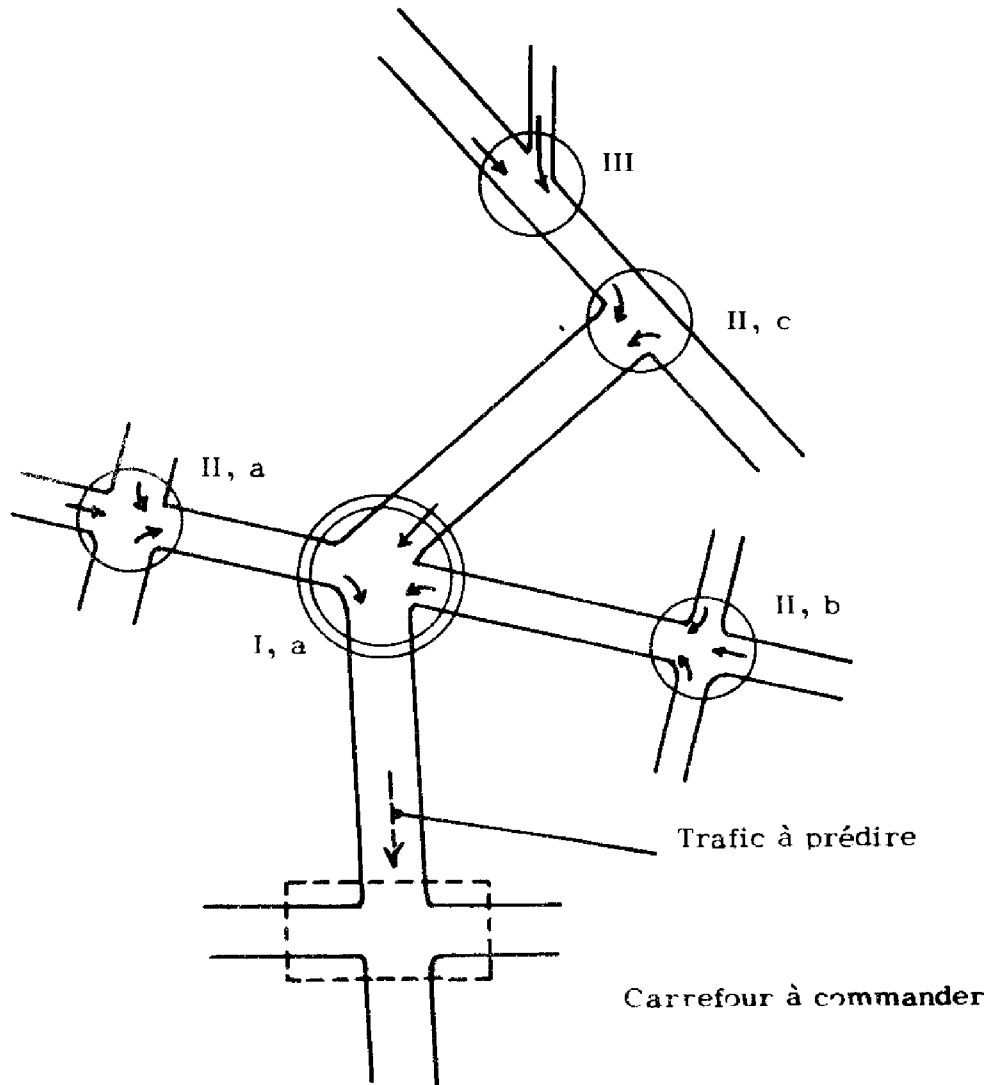
---

## CHAPITRE II

### LA PREDICTION DU TRAFIC

#### II . 1 . - ORGANISATION DE L'ACQUISITION D'INFORMATION

Intéressons-nous à l'analyse de l'écoulement des véhicules à l'intérieur du réseau ci-dessous.



- Figure 45 -

Le trafic sur une voie d'accès du carrefour à commander dépend (voir schéma) de l'ensemble des flux qui convergent sur cette voie après la traversée de un ou plusieurs carrefours.

Il y a généralement :

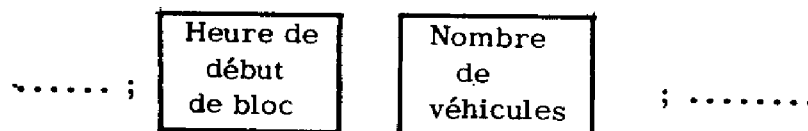
- . Un carrefour de degré un (I, a) qui débite directement dans le carrefour à commander.
- . Plusieurs carrefours de degré deux (II, a ; II, b ; II, c) dont les flux sortants iront franchir I, a.
- . Un nombre encore plus grand de carrefours de degré trois, etc....

Il pourrait donc, a priori, paraître intéressant de détecter le passage des véhicules à tous ces carrefours puis de simuler leur avancement jusqu'au carrefour à commander par des modèles de propagation incluant les temps de parcours, le réglage des feux, et les pourcentages d'orientation dans les trajets intermédiaires.

Avec de tels modèles, il serait alors possible d'obtenir des horizons de prédiction au niveau du feu à piloter de l'ordre de plusieurs minutes mais le volume des données est si important que, du moins dans une première étape, nous avons renoncé à une telle procédure. Nous nous limiterons donc volontairement à un horizon plus restreint (de l'ordre de deux minutes) mais ceci nous semble acceptable, compte tenu de la fréquence d'intervention du modèle de décision.

Le modèle de prédiction que nous avons adopté travaille avec seulement le carrefour primaire amont comme source d'information. Notre objectif étant de prévoir le diagramme de passage des pelotons au niveau des feux du carrefour à commander, notre premier travail a été la mémorisation de leur passage à la sortie de chacun des carrefours amonts. Pour cela, nous avons eu la possibilité d'utiliser le modèle de simulation hybride de trafic urbain du L.A.A.S., sur lequel il était relativement facile de comptabiliser le passage des véhicules. Notre méthode consistait simplement en une scrutation périodique

des débits passés en un point donné, suivie d'une écriture en mémoire sous forme de blocs successifs de deux octets du type :



- Figure 46 -

#### Constitution d'un "bloc d'information"

La période de scrutation étant de 6 secondes, il était ainsi possible, en mémorisant seulement 15 blocs (soit 30 octets de la mémoire centrale) d'obtenir le profil des 90 dernières secondes de trafic.

Remarque : Notons, dès maintenant qu'il est possible de tenir compte des véhicules prioritaires en les intercalant artificiellement dans l'historique du trafic. La présence d'un véhicule prioritaire se traduit alors par un des blocs précédemment définis et le nombre de véhicules de ce bloc est l'image de la priorité accordée.

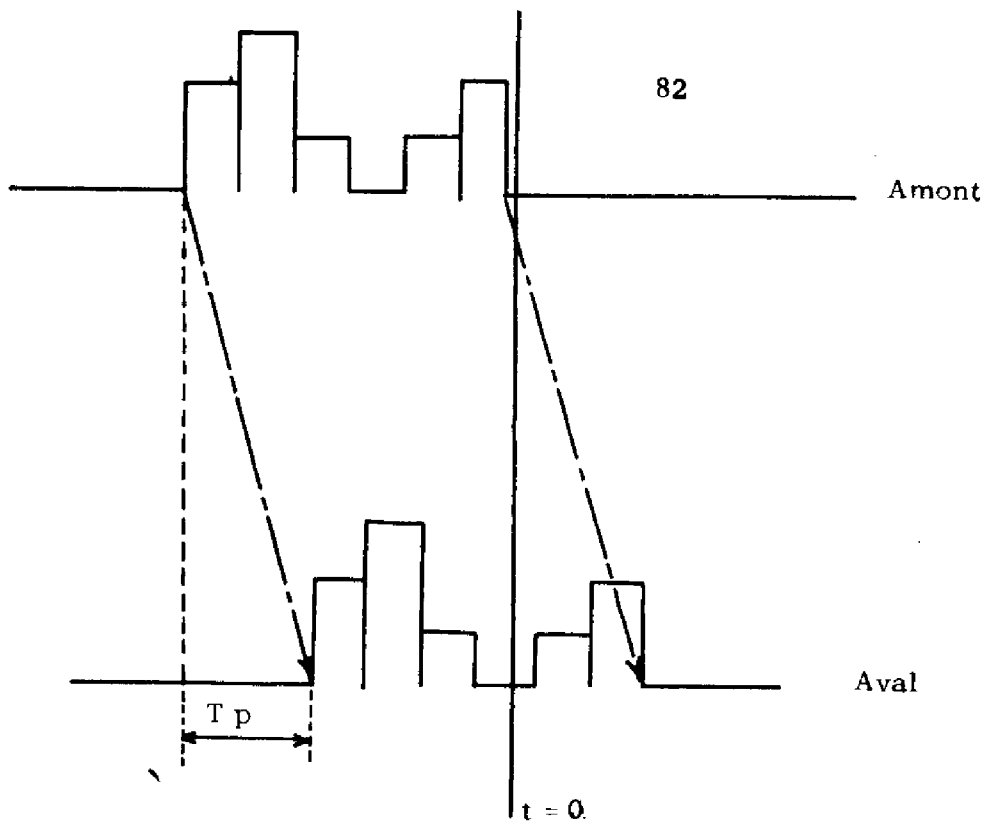
Cet historique de la demande à la sortie du carrefour amont pendant les dernières secondes sera l'information d'entrée de notre modèle de prédiction.

## II . 2. ) - LE MODELE DE PREDICTION DU TRAFIC

Dans tout modèle de prédiction, il faut faire des hypothèses sur le comportement du processus. Nous allons présenter celles que nous avons dû faire, puis nous essayerons de les justifier par des mesures expérimentales sur site.

II.2. a) - Première hypothèse : Le temps de parcours des véhicules entre le carrefour amont et le carrefour à piloter est constant.

Ceci veut dire que nous négligeons la variation de la vitesse en fonction de la concentration ainsi que la diffusion des pelotons dans le tronçon. Dès lors, l'historique d'arrivée s'obtiendra tout simplement par un décalage temporel de l'historique de départ (voir schéma).



- Figure 47 -

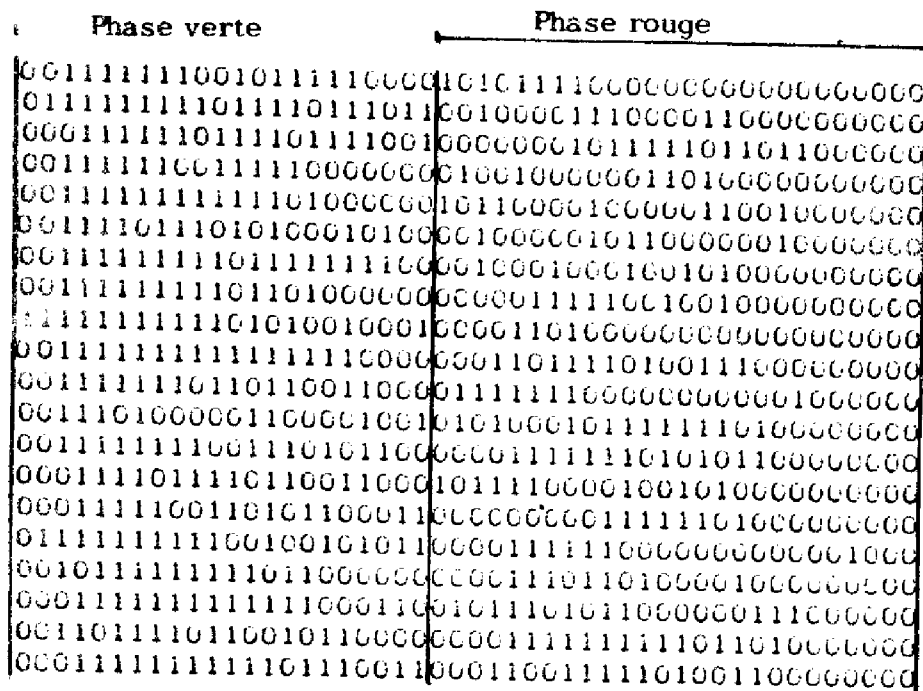
#### REPRESENTATION GRAPHIQUE DE LA 1<sup>ère</sup> HYPOTHESE

Cette première hypothèse nous permet d'obtenir une prédiction de l'ordre du temps de parcours ce qui, malheureusement, est insuffisant pour notre algorithme de commande. De ce fait, nous avons été amenés à émettre une hypothèse supplémentaire plus audacieuse, et qui concerne la périodicité de la demande d'un cycle sur l'autre.

Le début des véhicules sortant du carrefour amont dépend directement de l'état de ses feux. En particulier, en régime stable, leur fonctionnement cyclique laisse apparaître une "pseudo-période de reproductibilité" des historiques de sortie, égale au cycle du carrefour.

Nous avons étudié cette propriété de l'écoulement en milieu urbain à partir des mesures réalisées sur site à la sortie d'un carrefour de la ville de Toulouse. Nos outils de travail étaient de simples magnétophones qui nous permettaient d'enregistrer le passage des véhicules ainsi que le basculement des feux. Ces informations étaient ensuite dépouillées en utilisant le système temps réel CII 10 O10 (voir annexe). Le cycle était divisé en segments de 2 secondes et nous

associons un bit du calculateur à chacun de ces intervalles. Ce bit était à 1 s'il y avait eu passage d'un véhicule au moins pendant les deux secondes. Nous donnons ci-dessous un exemple de mesures effectuées sur 20 cycles successifs.



- Figure 48 -

#### REPRESENTATION DES PASSAGES REELS A LA SORTIE D'UN FEU

Ce qui nous intéressait était de savoir dans quelle mesure la connaissance de l'historique de sortie du cycle (n) nous permettait de prévoir l'allure des sorties pendant le cycle (n+1). Quelle était la "fonction d'autocorrélation" de l'écoulement et, en particulier, était-il raisonnable de faire l'hypothèse d'une reproduction des historiques d'un cycle sur l'autre ?

La réponse à cette question nous a été apportée par l'étude des mesures sur site. Nous présentons, ci-dessous, un tableau où figurent d'une part les historiques des différents cycles, d'autre part les pourcentages des passages qui auraient pu être prédits pendant le cycle (n) par simple duplication de l'historique du cycle (n-1).

N° du cycle		% prédictible
2	001111111001011111000010101111000000000000000000000	58
3	011111111011110111011101100100001100001100000000000	64
4	0011111100111110000000010010000001101000000000000	64
5	001111111111110100000010110000100000110010000000	55
6	001111011101010001010000100000101100000010000000	75
7	001111111110111111110000100010001001010000000000	54
8	001111111110110100000000000111110010010000000000	76
9	1111111111101010010001000010000101000000000000000	66
10	001111111111111111000000011011110100111000000000	53
11	001111111011011001100001111111000000000001000000	76
12	0011010000011000010010101000101111110100000000	47
13	0011111111001110101100000011111101010110000000	52
14	00011110111101100110001011110000100101000000000	60
15	0001111100110101100011000000001111110100000000	47
16	011111111110010010101100001111110000000000001000	50
17	00101111111101100000000001110110100001000000000	68
18	0001111111111110001100101110101000000111000000	56
19	00110111101100101100000001111111111011010000000	58
20	0001111111111011001100011001111101001100000000	65

- Figure 49 -

ETUDE DE LA "FONCTION D'AUTOCORRELATION"  
D'UN CYCLE SUR L'AUTRE

Le pourcentage moyen de prédiction est de 60 %, ce qui nous a paru suffisant pour valider notre deuxième hypothèse de prédiction.

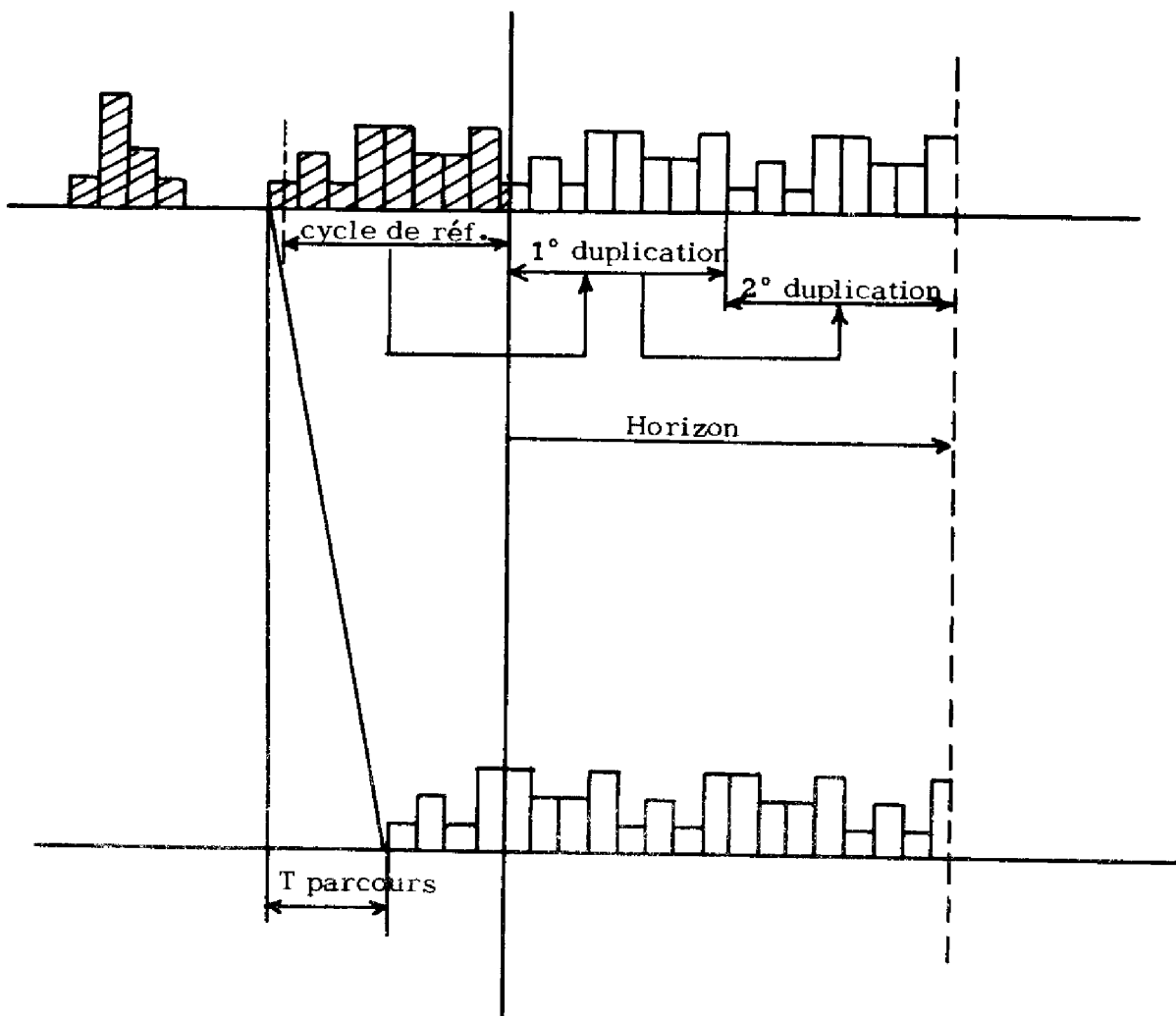
Notons d'ailleurs que cette hypothèse a autant de valeur que celle qui consiste à déclarer le trafic "stationnaire" pour les politiques fixes.



II.2. b) - Deuxième hypothèse : L'écoulement à la sortie du carrefour amont peut être considéré avec une approximation suffisante comme un phénomène périodique pulsé par la rotation des feux de ce carrefour.

Si le carrefour est lui-même adaptatif, son cycle est variable autour d'un cycle de consigne (nécessité des rattrapages de coordination). Pour la prédiction du trafic, c'est cette valeur de consigne,  $cyd$  e commun de la zone, que nous avons choisie. Elle nous permettra d'estimer l'arrivée des véhicules pendant les deux prochains cycles.

L'horizon obtenu, de l'ordre de deux minutes, est alors suffisant pour notre modèle de simulation en régime fluide.



- Figure 50 -  
EXEMPLE DE PREDICTION DU TRAFIC

Notre souci majeur tout au long de ce travail a été d'aboutir à une prédiction effectivement opérationnelle en temps réel, compte tenu de la place mémoire et de la puissance de notre calculateur.

Nous pensons avoir trouvé un compromis acceptable mais il est certain que des calculateurs plus puissants pourraient permettre la "prédiction à l'ordre 2" c'est-à-dire sur un horizon plus grand, tout en évitant la présence d'un capteur de débit à chaque sortie de carrefour.

Il y a là un travail de minimisation du nombre des points de captation qu'il reste à effectuer pour pouvoir aborder le traitement de grandes zones.

---

## CHAPITRE III

### LA PREDICTION DE L'ETAT DES FEUX

#### III . 1 ) - PROBLEME

Dans notre commande, les feux n'ont pas nécessairement un cycle constant puisque les durées de vert et de rouge sont révisées à chaque rotation. A un instant donné, il n'est donc pas possible de connaître rigoureusement l'état futur des feux et, cependant, nous avons besoin de cette information pour la construction du diagramme des feux du carrefour aval auquel risquent de s'arrêter les véhicules sortant du carrefour à commander. Nous devons aussi estimer les heures de commutation de la phase que nous pilotons car nous ne connaissons parfaitement que la première.

L'estimation sera bonne si l'on ne tolère que des faibles variations mais la commande risque alors d'être peu efficace. Par contre, de trop grandes variations du cycle rendraient très difficile la prédiction des feux. Il y a là un compromis à trouver entre efficacité de la commande et qualité de la prédiction.

En réalité, les variations de cycle de chaque carrefour ne sont pas absolument anarchiques puisque, comme nous l'avons précisé pour l'estimation du trafic, nous imposons un cycle de consigne dans le but de stabiliser le point de fonctionnement de chaque carrefour. Si donc, à un instant donné, la somme du vert et du rouge d'une certaine phase est différente de cette consigne, cela signifie que le carrefour auquel appartient cette phase est en rattrapage de coordination et, à la condition de lui donner suffisamment de liberté, nous pouvons admettre que ce rattrapage s'effectuera en un seul cycle. C'est l'hypothèse que nous avons faite pour déterminer l'algorithme d'estimation de l'état futur des feux.

III . 2 ) - HYPOTHESE . Si nous appelons V1 et R1 les derniers verts et rouges d'une phase  $\varphi$  , nous admettrons que, dès le cycle suivant et autant que le permettent les contraintes, les nouveaux V2 et R2 auront rejoint le cycle de consigne (donc  $V2 + R2 = \text{Cycle de consigne}$ ) tout en respectant la conservation du split. ( $V2/R2 = V1/R1$ ).

Au cours de chaque décision cette hypothèse sera appliquée à chacune des phases du carrefour à piloter ainsi qu'à chacune des phases avals.

Pour l'estimation des phases à piloter, V1 et R1 précédemment définies seront les sorties du modèle de décision. Pour les phases avals, ces nombres seront lus dans une table d'état des feux dont nous allons préciser la gestion.

### III . 3 ) - GESTION DE LA TABLE D'ETAT DES FEUX

De même que nous mémorisons le passage des véhicules, nous allons comptabiliser l'état des feux de tout le réseau. A chaque basculement de feu, nous venons mettre à jour la table de la phase qui vient de changer d'état.

La composition de la table d'état des feux est la suivante :

Etat
Heure dernier basculement
Heure désirée fin de vert
Dernier vert
Dernier rouge

- Figure 51 -

Table d'état des feux

Elle est dupliquée à autant d'exemplaires qu'il y a de phases dans le réseau à piloter.

L'erreur sur la prédiction des feux, si elle est nulle lorsqu'un régime cyclique est atteint, est assez importante en régime transitoire et peut même donner, dans certains cas, de mauvais résultats. Ceci est dû au fait que notre modèle d'estimation est trop simple. Un traitement plus élaboré pourrait permettre, avec des moyens plus importants, d'utiliser la connaissance des fluctuations de la demande plusieurs carrefours en amont pour dégager les tendances des futures variations de cycle. Nous n'avons pas franchi cette étape.

---



## CHAPITRE IV

### LES MODELES DE DECISION

Les informations recueillies puis traitées par les modèles de prédiction (prédiction du trafic et des feux) vont maintenant être utilisées par un modèle de décision qui va calculer quel est, sur son horizon de simulation, la meilleure politique de commutation du feu à piloter.

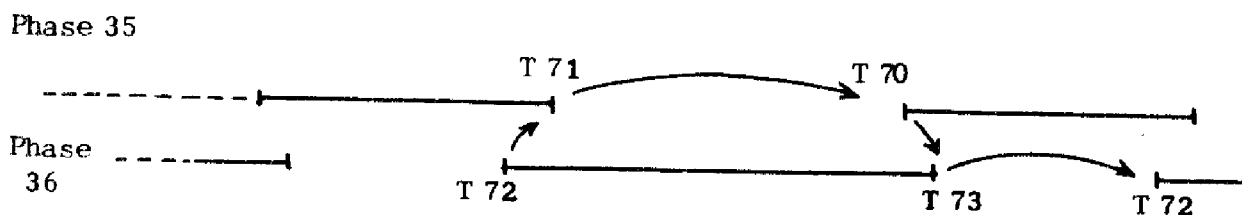
Nous allons détailler l'organisation de la rotation des feux et la façon dont nous appelons le modèle de décision. Ensuite, nous présenterons quelques modèles possibles de décision ; enfin, nous développerons parmi ces derniers celui que nous avons retenu pour la gestion des régimes fluides.

#### IV . 1 ) - ORGANISATION DE LA ROTATION ADAPTATIVE DES FEUX.

La rotation des feux d'un carrefour est une succession de travaux élémentaires que nous appellerons "tâches". A un instant donné, la tâche en attente du carrefour n (elle est unique) est dite "activée" et elle se trouve alors dans la "File d'attente" du calculateur, accompagnée de son heure d'exécution. Les travaux qu'elle appelle seront déroulés lorsque le contenu de l'horloge temps réel sera égal à l'heure prévue d'exécution.

Dans le cas particulier de la commande à cycle fixe, chaque tâche "active" la suivante avec une durée constante.

Dans notre commande, certains de ces délais sont variables. Ils sont modulés directement par le modèle de décision.



- Figure 52 -

Exemple de commande à cycle fixe des phases 35 et 36.

Ce modèle de décision sera d'autant plus performant qu'il aura des informations récentes sur l'écoulement et l'état des feux avoisinants. Nous avons donc intérêt à prendre notre décision le plus tard possible mais, dans l'exemple ci-dessus, avant l'exécution de T 70. Compte tenu du fait que l'exécution de cette tâche peut être anticipée par rapport à la dernière durée de vert et qu'il existe, d'autre part un vert minimum à respecter, nous devons solliciter l'intervention du modèle un délai T après la tâche T 71 et T devra vérifier la condition.

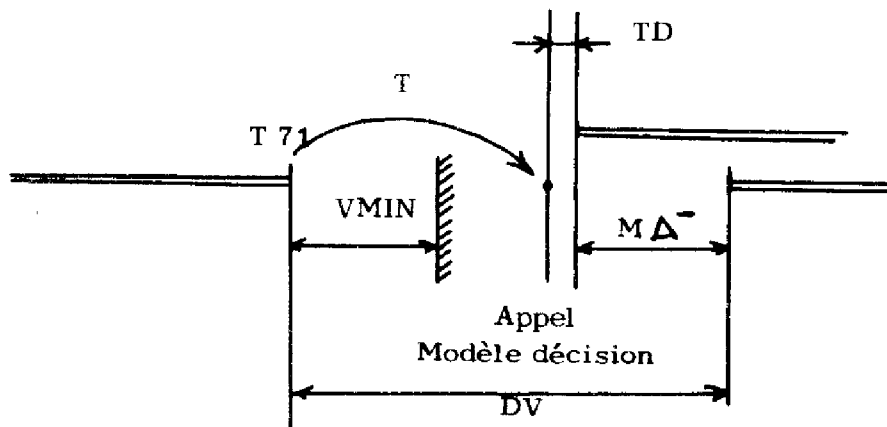
$$T \leq T_{opt}$$

$$T_{opt} = \max \left( V_{MIN}, DV - (M\Delta^- + TD) \right)$$

Expression dans laquelle : DV = Durée du dernier vert

$M\Delta^-$  = Réduction maximum possible de la durée de vert d'un cycle sur l'autre.

TD = Majorant du temps de prise de décision.



- Figure 53 -

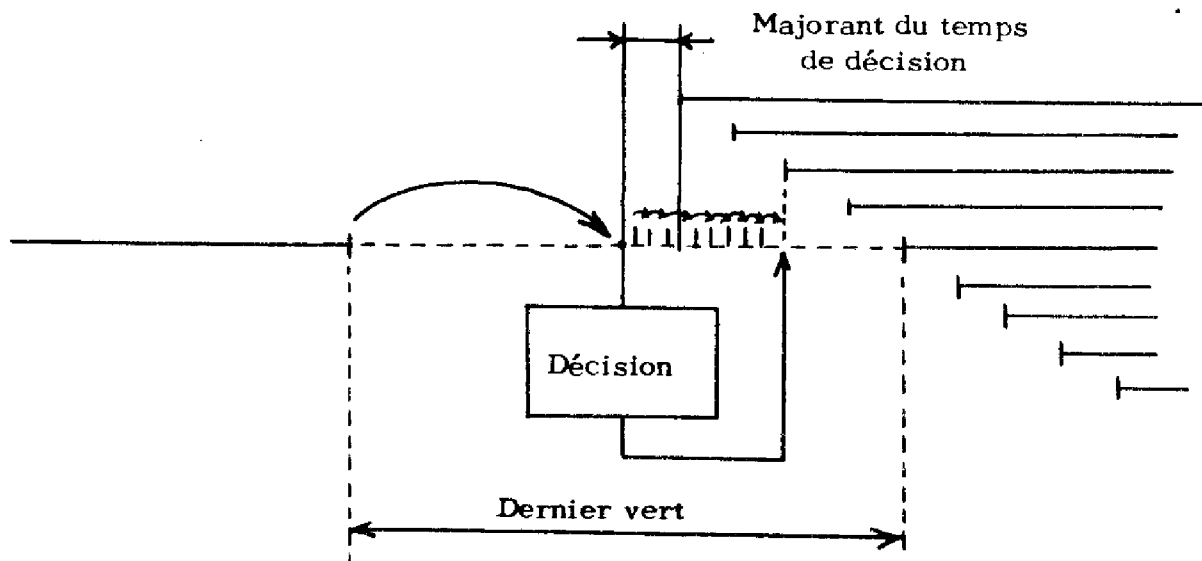
Détermination de l'instant d'appel du modèle de décision.



Simultanément, nous activons une tâche de basculement conditionnel au rouge dont le travail consiste à comparer l'heure réelle avec l'heure de fin de vert désirée, laquelle est précisée dans la table d'état des feux et a été, au départ, calculée pour respecter le dernier vert.

Si l'heure réelle est égale à l'heure désirée, le basculement du feu est effectué. Dans le cas contraire, la tâche de basculement conditionnel se réactive elle-même et sera exécutée à nouveau la seconde suivante, etc....

Nous voyons donc que, s'il n'y a pas d'intervention extérieure qui modifie l'heure de fin de vert désirée, les feux tourneront à cycle fixe. Par contre, si le modèle de décision désire raccourcir ou rallonger la durée du vert, il suffit qu'il calcule l'heure de fin de vert désirée correspondante et qu'il la range dans la table d'état des feux.



- Figure 54 -

Actions possibles de la décision.

Ces schémas montrent clairement que le temps de calcul est un problème important de ce type de commande et, de ce fait, l'augmentation du nombre d'itérations pour la recherche de la meilleure politique est limitée par la nécessité de travailler sur une information récente.

Il y a cependant une tolérance assez large et, dans la méthode que nous proposons pour le contrôle des régimes fluides, nous avons même disposé d'assez de temps pour réaliser une double optimisation (cycle et split) dans le modèle de décision.

#### IV . 2 ) - LES DIFFERENTS MODELES DE DECISION

Nous abordons là le point le plus intéressant parce que le plus prometteur de notre nouveau style de commande des feux.

En effet, si notre décision finale est élémentaire, elle doit cependant être dictée par une série de considérations qui peuvent être très variées et surtout commutables en fonction du lieu ou des heures de fonctionnement.

A la limite, nous pourrions envisager de "personnaliser" chaque carrefour par la liste des facteurs qui influencent son fonctionnement: Tel carrefour serait commandé, par exemple, d'après la mesure du nombre de véhicules passés en amont le cycle précédent, tandis que tel autre aurait pour fonction d'éviter l'engorgement des tronçons avals et serait donc piloté d'après les longueurs de queues ou toute autre observation permettant une décision convenable. Avec notre commande, une telle "individualisation" est parfaitement possible et facilement réalisable.

De plus, la nature du "critère local" peut être variable dans le temps suivant les consignes d'un stratège supérieur détectant le degré de fluidité de l'écoulement.

#### IV.2. a) - CONTROLE DES REGIMES FLUIDES

En régime fluide, nous chercherons à faciliter au maximum l'écoulement des véhicules en minimisant leur temps d'attente sur l'horizon de simulation et en faisant intervenir, non seulement le carrefour à piloter, mais aussi le premier carrefour aval de chaque voie. Par ce biais, nous incluons dans la décision le souci de coordination dont l'absence constitue le principal défaut des

commandes adaptatives.

Un algorithme de décision a été conçu pour le contrôle des régimes fluides; nous le présenterons plus en détail au chapitre suivant.

Nous pouvions a priori, redouter que le réglage obtenu par juxtaposition d'optimisations partielles soit foncièrement différent de l'optimum global obtenu par une méthode classique. En particulier, la coordination allait-elle apparaître ?

Les premiers résultats acquis montrent clairement que l'horizon d'optimisation choisi (de l'ordre de deux cycles) est suffisant pour le traitement de tels régimes. Sur une artère, la coordination apparaît nettement et, de plus, l'abandon de l'hypothèse d'un régime permanent permet de travailler sur des informations réactualisées à chaque intervention.

La "dérive" entre "l'état simulé" du trafic et l'"état réel" est ainsi plus réduite ce qui explique, en partie, les performances de la méthode.

#### IV.2. b) - CONTROLE DES REGIMES SATURES

En régimes saturés et sursaturés, il devient primordial de pouvoir maîtriser les débits dans les différentes artères du réseau. Notre commande peut fournir un outil très pratique pour ce genre de régulation. On peut concevoir, en effet, de comptabiliser la capacité d'accueil instantanée de chaque tronçon et de réagir en conséquence sur le réglage des carrefours amonts. Il est également possible d'inclure des rouges barrages adaptatifs ou tout autre modification du diagramme des feux qui peut sembler intéressante.

Il semble cependant que l'horizon de travail de notre modèle soit insuffisant pour le calcul des stratégies de décongestion d'un réseau entier, pour lesquelles une vision beaucoup plus large du trafic est indispensable. Dans ce domaine, un "stratège supérieur" reste encore à définir et il y a là un important travail de recherche à effectuer.

#### IV.2. c) - CONTROLE DES REGIMES DE TRANSITION

Fluide → saturé

Saturé → fluide

Lorsque, après un régime fluide, la charge du réseau atteint un certain seuil, proche de la saturation, les objectifs **changent** et il peut alors être intéressant de commuter le modèle de décision.

Sur ce point, l'outil de commande que nous proposons est également très souple. Le changement de critère peut, en effet, être appliqué à certains carrefours et pas à d'autres, suivant les consignes d'un algorithme de transition (Fluide  $\rightarrow$  saturé ou Saturé  $\rightarrow$  fluide) détectant en temps réel les zones congestionnées du réseau.

Le problème de ces transitoires pourrait alors être abordé sous un angle nouveau. Notons cependant que nous n'avons rien entrepris, pour l'instant, dans ce domaine.

#### IV. 2. d) - INCLUSION DE VEHICULES PRIORITAIRES DANS LA DECISION

Dans notre commande, il est possible de réaliser cette inclusion sans affecter la nature du modèle de décision. La détection d'un véhicule prioritaire se traduit alors simplement par la superposition au trafic de base (véhicules individuels) de bandes artificielles représentant les véhicules à privilégier. Il y a donc intégration d'un phénomène supplémentaire mais conservation de la structure générale de l'algorithme. De ce fait, la seule difficulté réside dans la localisation des véhicules à privilégier.

Le travail que nous avons entrepris semble donc apporter une solution nouvelle à certains problèmes délicats encore en suspens cependant, malgré tous ses avantages, la microrégulation conserve une vision très locale du trafic, ce qui ne permet pas d'affirmer à priori que le plan général de contrôle est proche de l'optimum global. Le seul moyen d'évaluer l'efficacité d'une telle commande sur l'ensemble d'un réseau était de tester réellement "sur site" (pour nous, le simulateur hybride) son comportement. C'est ce travail que nous allons présenter dans le chapitre suivant.

## C H A P I T R E    V

### REALISATION PRATIQUE D'UN MODELE DE DECISION

#### EN REGIME FLUIDE

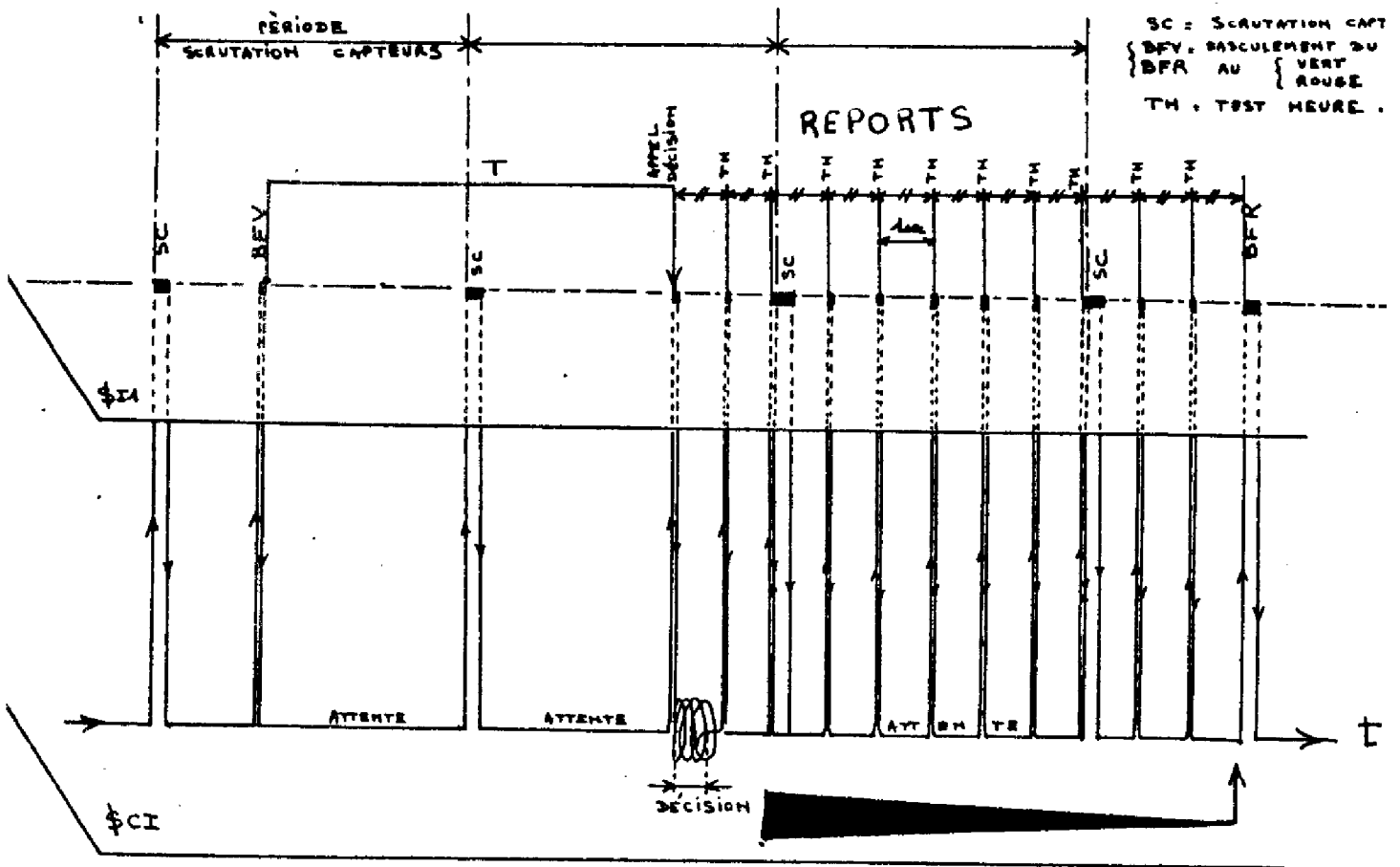
Nous allons présenter plus en détail le modèle de décision en régime fluide qui a été mis au point sur un C.I.I. 10.010 de 12 K octets pour piloter les feux de trafic du simulateur hybride de Trafic Urbain du L.A.A.S.

Pour faciliter la lecture de la suite de ce mémoire, nous décrirons rapidement l'organisation des travaux sur le calculateur. Ensuite, nous détaillerons le modèle de décision et, enfin, nous présenterons les premiers résultats obtenus sur un carrefour isolé puis sur une artère.

#### V. 1. ) - ORGANISATION DES TRAVAUX SUR LE CALCULATEUR.

Le C.I.I. 10.010 possède quatre niveaux d'interruption ( \$ 10, \$ I 1, \$ I 2, \$ I 3 ) plus le niveau standard ( \$ CI ). La rotation des feux, qui ne doit souffrir aucun délai d'attente, est exécutée au niveau \$ I 1. Le \$ I 0 n'étant pas utilisé, c'est donc avec une priorité absolue que se déroulent les "tâches" de basculement des feux précédemment définies, assurant ainsi un respect total des points de consigne. C'est également à ce niveau que s'effectue la scrutation périodique des capteurs du réseau.

Avec la priorité la plus basse, et lorsqu'on le sollicite, le niveau standard se charge du travail de simulation puis vient ranger sa décision dans la table d'état des feux, laquelle est ensuite interprétée en temps utile avec la priorité \$ I 1. La découpe des travaux exécutés aux niveaux \$ CI et \$ I 1 est représentée sur le schéma suivant .



- Figure 55 -

Découpe des travaux \$I 1 et \$CI en fonction du temps.

#### V. 1) - ORGANISATION DES TRAVAUX SUR LE CALCULATEUR

Le programme de décision se déroule en 3 temps :

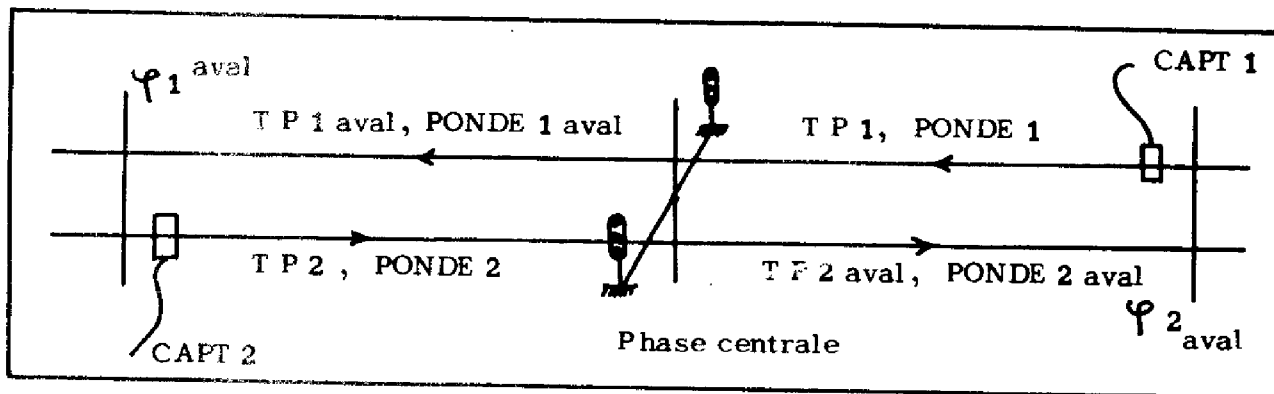
- a) - Construction de l'environnement du carrefour à commander.
- b) - Prédiction du trafic et des feux concernés.
- c) - Recherche du meilleur vert, suivie du calcul et du rangement de l'heure de fin de vert désirée.

Nous allons présenter les travaux que réalise chacune de ces phases.

V.2. a) - Construction de l'environnement du carrefour à commander.

Le programme d'appel précise seulement au modèle quel est le numéro de la phase à piloter. Le modèle doit alors chercher, au moyen de tables, à reconstruire l'environnement de chacune des phases du carrefour concerné.

Chaque phase conditionne l'écoulement dans un certain sous-ensemble du réseau que nous pouvons schématiser ainsi :



- Figure 56 -

Sous-ensemble du réseau directement concerné par la décision de notre modèle.

Ces informations suffisantes pour reconstruire la géométrie de chaque carrefour sont stockées dans une "table de simulation" dont la composition est la suivante :

<u>Sens 1</u> :	Capt 1	Capt 2	<u>Sens 2</u>
	T P 1	T P 2	
	Ponde 1	Ponde 2	
	$\psi$ 1 aval	$\psi$ 2 aval	
	T P 1 aval	T P 2 aval	
	Ponde 1 aval	Ponde 2 aval	

Capt = numéro du capteur ; T P = Temps de parcours ;  $\psi$  = n° de phase  
 Ponde = coefficient de pondération.

Les coefficients de pondération affectent le calcul du critère total de la façon suivante

$$\text{Critère Total pour la décision} = \sum_{\text{Tout le réseau considéré}} \text{ponde}_i \cdot C_i$$

$C_i$  = critère d'arrêt à 1 phase.

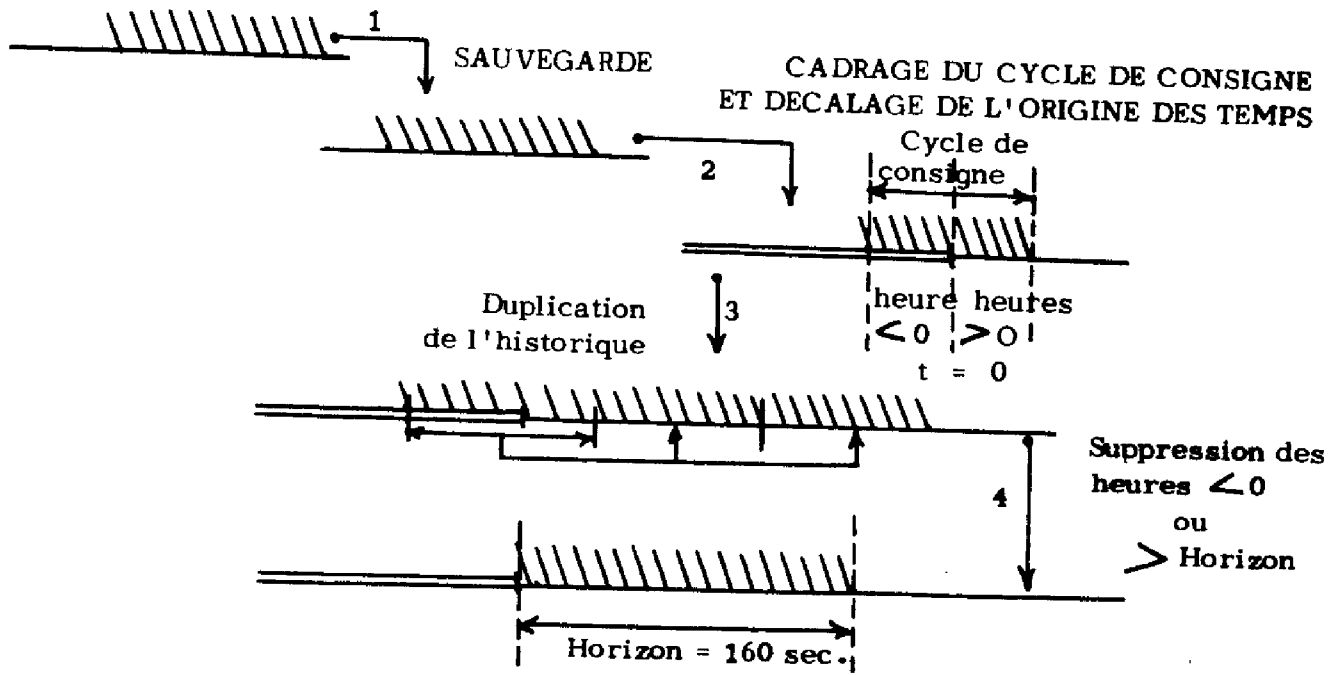
Ils permettent ainsi de moduler les priorités, de tenir compte du nombre de voies et même de supprimer la prise en compte de certains sens de circulation au moment de la simulation.

#### V. 2. b) - Prédiction du trafic et des feux

La prédiction du trafic commence par la sauvegarde de tous les historiques délivrés par les capteurs nécessaires à la simulation. Ce "gel" de l'information (sous-programme PRESB) est rendu indispensable par le fait que les tables originales sont modifiées en permanence, même pendant la prise de décision. Chacun des historiques est ensuite conditionnellement (sous-programme TEST) propagé (sous-programme PROPA) jusqu'à la ligne du feu à franchir puis subit l'application des hypothèses de reproduction que nous avons détaillées dans un chapitre précédent.

A la fin de cette procédure, nous disposons sur chacune des voies d'accès de la demande estimée du trafic sur l'horizon de simulation (que nous avons pris égal à deux fois le cycle de consigne).



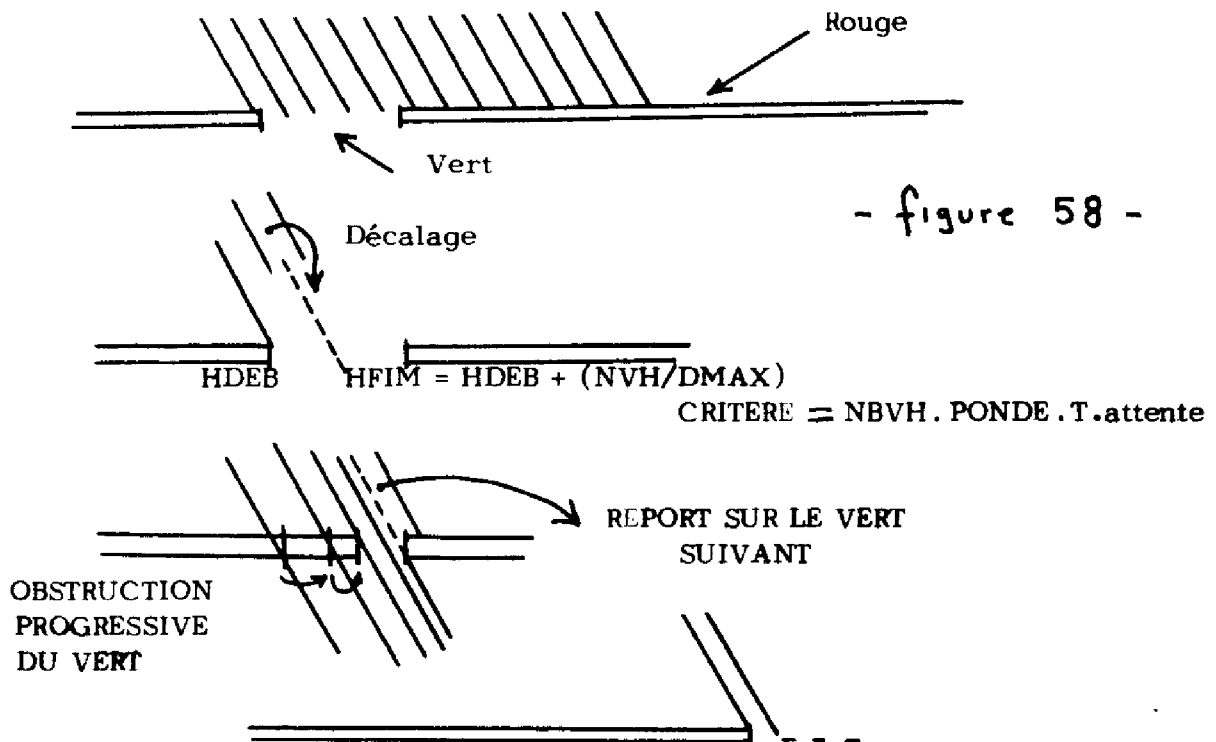


- Figure 57 -

Schéma de la prédiction du Trafic

C'est à ces historiques estimés que nous allons faire franchir les phases successives de notre simulation.

Le franchissement d'un feu par une bande de trafic est effectué d'après le schéma suivant.

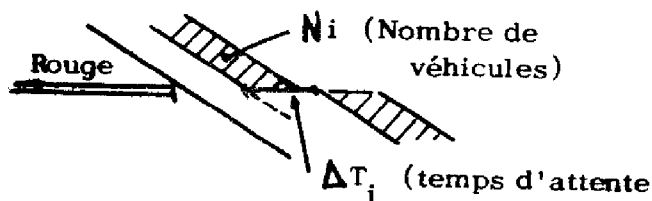


- figure 58 -

Lorsqu'une bande arrive au niveau de la ligne de feu, nous connaissons son heure de début et le nombre de véhicules qu'elle contient. En faisant une hypothèse sur la valeur du débit de saturation (dans notre cas  $Q_{\text{sat}} = 1,5 \text{ v/s}$ ) nous recalculons la largeur réelle de la bande.

$$H_{\text{fin de bande}} = H_{\text{deb}} + (nb_{\text{veh}} \cdot 1,5)$$

Si cette largeur dépasse un certain seuil (6<sup>tes</sup> secondes dans notre cas), l'écoulement de cette bande viendra gêner la bande suivante que nous décalerons en conséquence tout en incrémentant le critère de passage de la quantité :



$$\Delta \text{ critère} = N_i \cdot \Delta t_i$$

Après avoir franchi le feu, la bande vient réduire d'autant que valait sa largeur, la durée de vert de la phase.

Fig. 59 = Calcul du critère

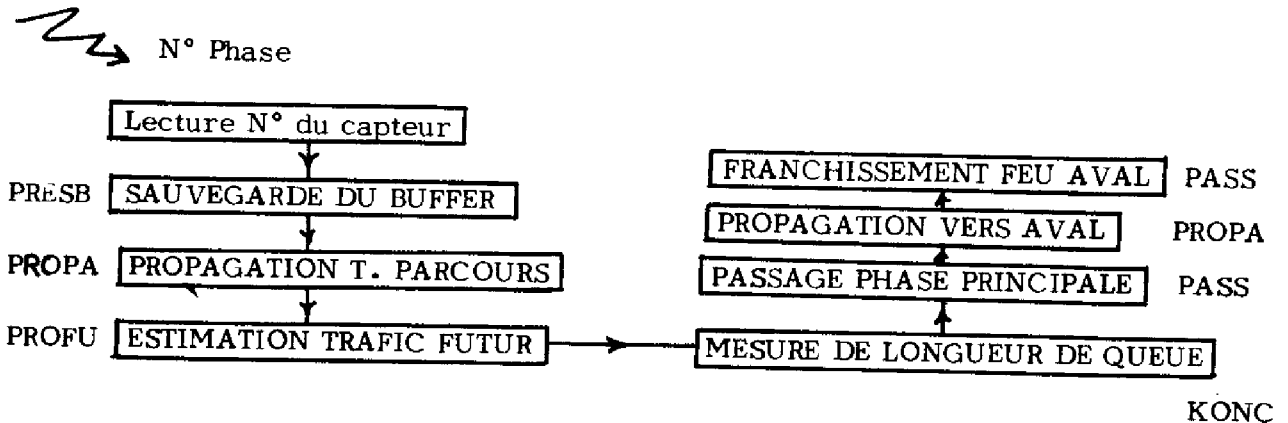
De cette manière, nous faisons traverser la ligne de feu à chacune des bandes, diminuant ainsi à chaque étape la durée de vert disponible. Lorsque tout le vert est obstrué, les véhicules arrivant doivent alors attendre, perdant toute la durée de la phase rouge, l'arrivée du vert suivant.

Ce travail (sous-programme PASS) est répété jusqu'à atteindre l'horizon de simulation (160 secondes dans notre cas).

Remarquons que cette simulation commence seulement au début du vert à piloter. De ce fait, sans précaution élémentaire, nous négligerions l'éventuelle queue qui aurait pu se former pendant le rouge précédent. En pratique, cette information fondamentale est mesurée en temps réel (mesure de concentration dans la première cellule en amont du feu), et, par un artifice de programmation (sous-programme KONC) nous générons en début de vert une bande fictive qui a pour but de représenter le démarrage de la queue formée pendant le cycle précédent.

Lorsqu'on inclut, dans la simulation, le franchissement de la phase aval, les bandes à la sortie du carrefour principal sont propagées à nouveau et viennent franchir par le même algorithme la ligne de feu aval.

Dans le cas le plus général, le cheminement de l'information et les traitements successifs qu'elle subit peuvent se présenter par le schéma suivant :



- Figure 60 -

#### Enchaînement des différents sous-programmes

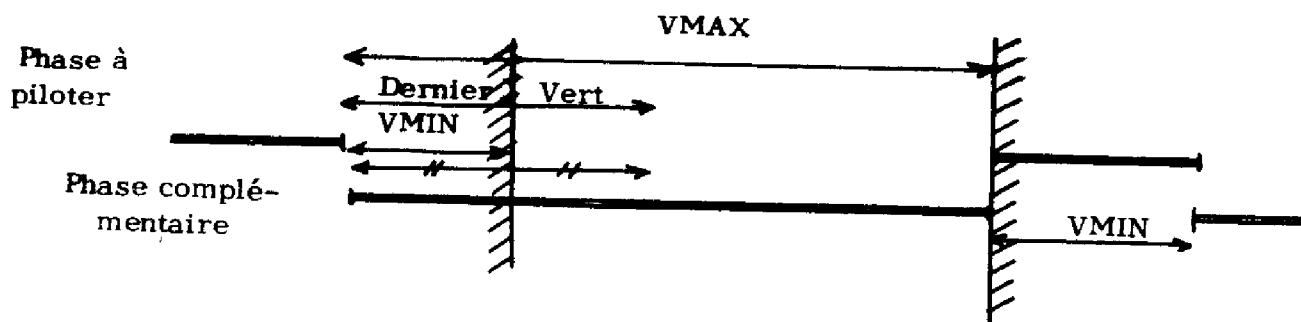
#### V.2. c) - Recherche de la meilleure politique

La demande en trafic ayant été construite, il s'agit maintenant de déterminer quelle est, sur l'horizon de simulation adopté et sur la zone choisie, la politique de régulation locale qui provoque le temps d'attente minimum pour le trafic simulé.

La méthode que nous avons retenue est une double optimisation sur le cycle et le vert de chaque phase adaptative.

Si nous appelons  $c_p$  et  $v_p$  les derniers cycles et vert de la phase à piloter, nous envisagerons une liste de variations possibles de ce cycle autour du dernier réglage et, pour chacun de ces cycles, nous simulerons, à la condition qu'ils soient réalisables, un ensemble de verts autour de la dernière consigne. Les contraintes de réalisabilité sont dues à l'existence d'un vert minimum et d'un vert maximum. Le vert minimum envisageable est égal à la moitié du vert précédent car,

• dans la version opérationnelle, nous avons convenu de ne lancer la simulation qu'à ce moment-là. Le vert maximum, lui, est fixé par la différence entre le cycle de consigne et le vert minimum de la phase complémentaire.



- Figure 61 -

#### Visualisation des contraintes

Les incréments retenus pour le cycle sont :

(-20, - 15, - 8, - 2, 0, 2, 6, 12, 20, 28, 34, 40) sec.

Les incréments du vert sont :

(-30, - 25, - 20, - 15, - 10, - 5, 0, 5, 10, 15) sec.

Lorsque l'on envisage la candidature d'un vert, le rouge suivant est calculé par différence entre le cycle et le vert considéré et ce réglage est également répercuté de façon complémentaire (vert  $\rightsquigarrow$  rouge ; rouge  $\rightsquigarrow$  vert) sur la phase antagoniste. Si toutes ces valeurs respectent les contraintes précisées ci-dessus, la simulation est entreprise et un critère est mémorisé.

Ce critère est chargé de mesurer les conséquences locales de la régulation testée . Nous avons créé deux options.

Option 1) - Seul compte le temps d'attente au carrefour commandé.

Option 2) - Au critère précédent, nous venons ajouter le temps d'attente aux carrefours avals.

Ces deux options ont été testées et comparées sur chacun des réseaux tests étudiés. (voir chapitres VI,4 ; VI,5 ; VI,6)

L'optimum est pour nous le réglage (cycle et vert) qui donne le temps d'attente minimum : c'est lui que nous appliquerons sur le site en venant

ajuster la durée de vert de la phase à piloter ainsi que celle de la phase antagoniste.

Il est à remarquer que dans certains cas, notre modèle est tel qu'il n'y a pas unicité du réglage fournissant le critère minimum mais, au contraire, un ensemble de valeurs possibles (minimum plat). Dans ce cas, nous avons a priori décidé d'appliquer le cycle et le vert minimum admissibles. Par la suite, cette décision arbitraire nous a semblé discutable, et il semble qu'il aurait été préférable d'utiliser un second critère de choix pour lever l'indétermination ; par exemple le nombre d'arrêts que l'on aurait pu obtenir facilement par notre modèle.

---



## C H A P I T R E VI

### ETUDE COMPARATIVE DU COMPORTEMENT DE L'ALGORITHME

Il est toujours extrêmement difficile d'effectuer des mesures comparatives entre deux politiques de régulation du trafic urbain car le nombre de paramètres influents est souvent très grand et c'est donc un travail minutieux que de reconstituer exactement les mêmes conditions de demande en trafic sur un réseau. Ce travail était cependant indispensable pour étudier le comportement et les performances de notre algorithme et nous avons dû, pour le réaliser, mettre en place toute une chaîne de mesure et de dépouillement que nous allons brièvement présenter.

#### VI . 1 ) - LES CONDITIONS DE LA MESURE

L'outil principal de ce banc de mesure était le simulateur hybride de Trafic Urbain dont la fonction a été de simuler, sur le réseau cablé et pour chaque configuration de trafic injectée, le comportement des véhicules imposé par la politique de feux que l'on est entrain de tester. Pour chacun de ces cas, nous avons effectué parallèlement :

- une analyse qualitative (au moyen d'une visualisation sur traceur 8 voies) des paramètres fondamentaux du réseau.
- une analyse quantitative du temps d'attente des véhicules en différents points du réseau.

La première de ces analyses nous permettait de "photographier" l'écoulement à l'intérieur du réseau et, éventuellement, d'ajuster certains réglages (modification légère des temps de parcours, mise en évidence d'un début de saturation, contrôle d'un rattrapage de coordination, mesure de la longueur de queue en fin de rouge, etc.....). Cette analyse a été systématiquement effectuée pour chacun

des cas ; cependant, nous ne présenterons dans ce mémoire que quelques échantillons.

Si cette première saisie d'information permet l'analyse détaillée du bon ou mauvais fonctionnement du système en nous donnant les moyens d'établir des relations de cause à effet, la seconde analyse fait l'intégration de tous ces facteurs en fournissant une quantité proportionnelle au temps que les véhicules ont passé à l'intérieur du réseau. Dans la pratique, cette information était traitée par le calculateur qui fournissait périodiquement, sous forme de ruban, les différentes mesures locales. Un traitement numérique de ces rubans était ensuite entrepris en vue d'effectuer les sommes partielles des temps d'attente, indispensables pour une interprétation claire des résultats.

La chaîne de mesure et de traitement ayant été mise en place, il nous restait à apporter des réponses aux deux questions suivantes :

- Sur quels réseaux..... )
- Par rapport à quelle référence..... )

notre politique adaptative ?

## VI . 2 ) - LE CHOIX DE L'ETALON DE REFERENCE

Nous avons arbitrairement convenu que cette référence serait la politique fixe optimale déterminée par l'application du modèle TRANSYT à chacune des configurations étudiées. Pour les régimes dynamiques (simulation des heures de pointe ou inversions de débits), nous avons pris les débits moyens équivalents pour calculer cette politique fixe.

## VI . 3 ) - LE CHOIX DES CONFIGURATIONS DE TRAFIC

Pour l'étude de son comportement, nous avons soumis notre algorithme à des difficultés graduées.



1er Réseau : un carrefour adaptatif isolé. Chacune des branches d'accès est

parcourue par le trafic sortant d'un feu à cycle fixe et égal au cycle de consigne.

Sur ce réseau, nous avons étudié 4 régimes d'écoulement :

- constant faible (480 véh/h)
- constant moyen (800 véh/h)
- constant fort (1150 véh/h)
- pulsé (de 480 à 1150 véh/h)

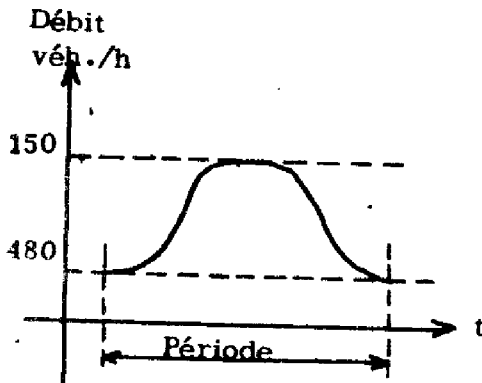


Fig. 62 : EXEMPLE DE DEBIT PULSE

2ème Réseau : Deux carrefours adaptatifs en ligne.

Les véhicules arrivant au premier de ces deux carrefours proviennent de feux à cycle fixe (en phase puis déphasés d'une demi-période). Par contre, le second a, comme débit d'entrée, la sortie du premier. Pour ce réseau, les quatre mêmes régimes d'écoulement ont été étudiés

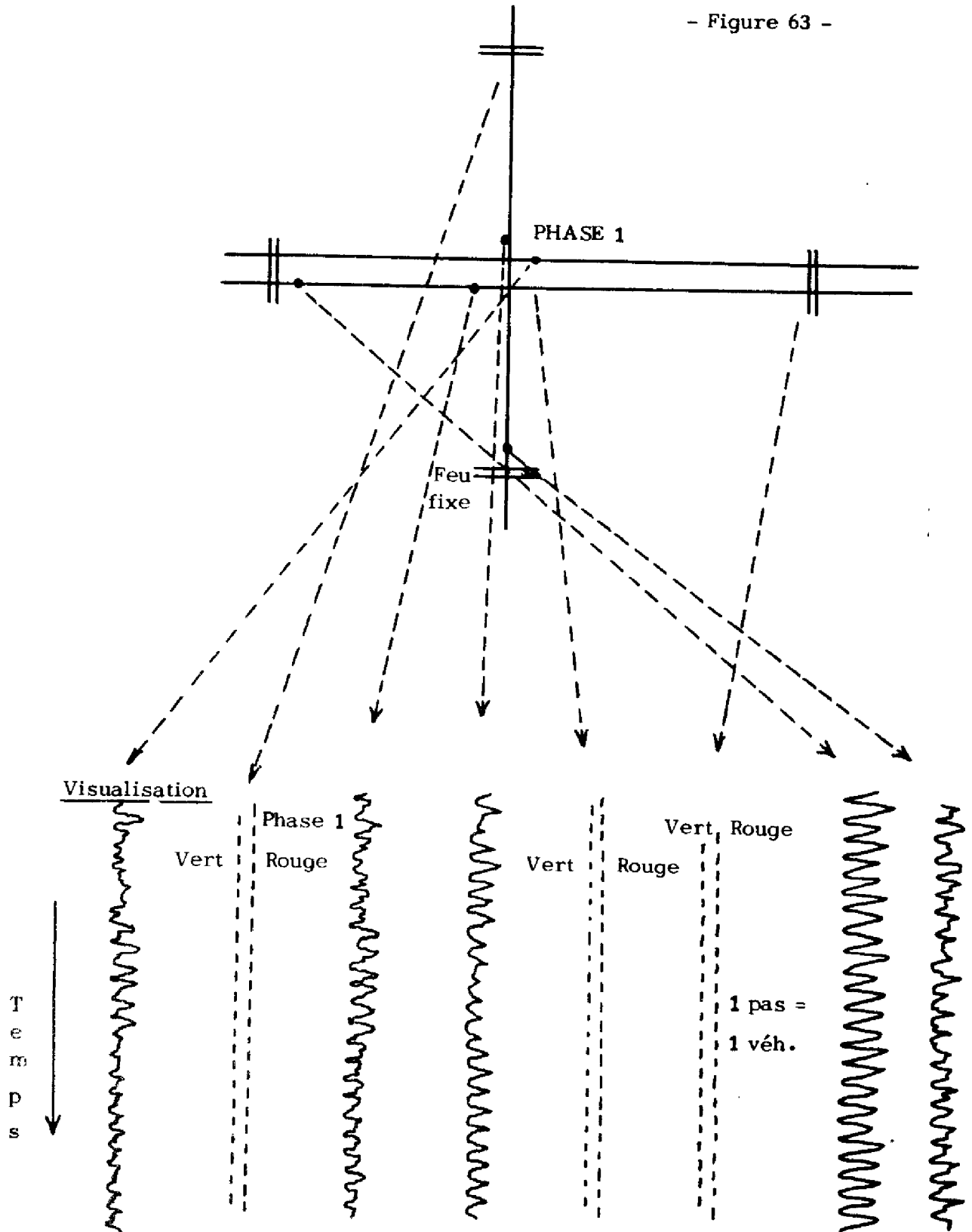
3ème Réseau : Une artère composée de 6 carrefours en ligne, les deux extrêmes étant à cycle fixe et en phase, les quatre centraux adaptatifs. Dans ce réseau, nous avons injecté également trois régimes d'écoulement constants puis un régime dynamique constitué de deux débits pulsés décalés d'une demi-période.

L'analyse de chacun de ces cas fait l'objet d'un des paragraphes suivants :

VI. 4 ) - ETUDE DU CARREFOUR ADAPTATIF ISOLE

VI. 4. a) - Description du réseau et détail de la visualisation  
sur traceur 8 voies

- Figure 63 -



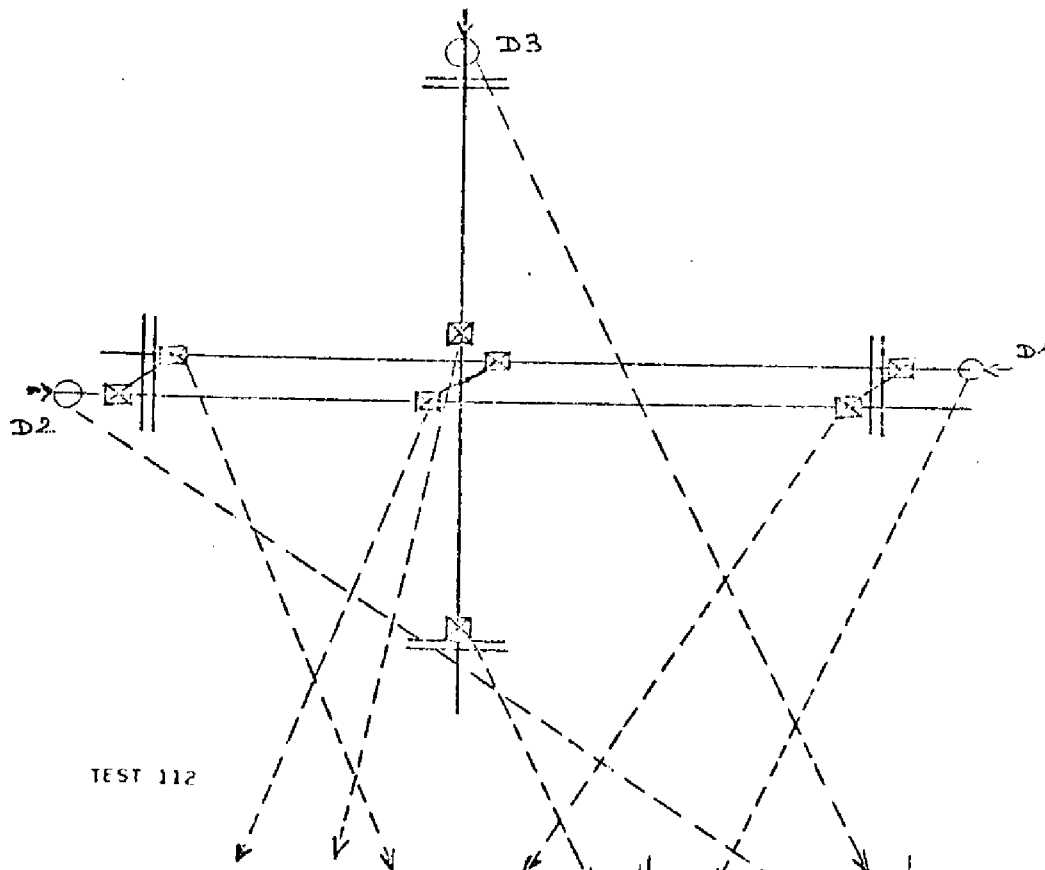
VI . 4. b) - Détail des divers points de mesure des critères.

Rappelons que toutes nos simulations étaient réalisées sur le simulateur hybride de Trafic Urbain lequel nous permettait de mesurer le temps de séjour des véhicules dans le réseau sous la forme :

$$\begin{aligned} \text{Temps de séjour} &= \sum \text{Temps de séjour} \\ \text{dans le réseau} &= \sum \text{dans les cellules} \\ \text{(en véh x scc)} &= \sum \int_t^{t+P} K \, dt \end{aligned}$$

P = période de mesure (Sec)

K = concentration dans la cellule (véh.)



INITIALISATION	127	127	128	121	105	0	0	0
400	659	76	353	292	206	25	25	25
560	705	78	398	321	316	26	26	27
720	764	66	449	368	394	21	25	25
880	813	91	373	312	386	23	26	25
1040	886	100	373	277	299	28	25	26
1200	824	193	339	296	261	27	25	25

Critères

Débits

Temps

Nos mesures portaient donc uniquement sur le temps de séjour (temps de parcours libre + temps d'attente) dans certaines cellules, généralement situées en amont d'un feu. De façon à pouvoir étudier séparément le critère dans chaque cellule, le calculateur fournissait les temps de séjour en chaque point de mesure (1 mesure par colonne). En sommant partiellement ces informations colonne par colonne, on peut ainsi reconstituer le temps d'attente dans chaque zone désirée.

Dans notre cas précis, il nous a semblé intéressant d'étudier pour chaque cas de trafic :

- au carrefour central
- aux feux fixes de la périphérie
- sur l'ensemble du réseau.

#### VI. 4. c) - Présentation des résultats :

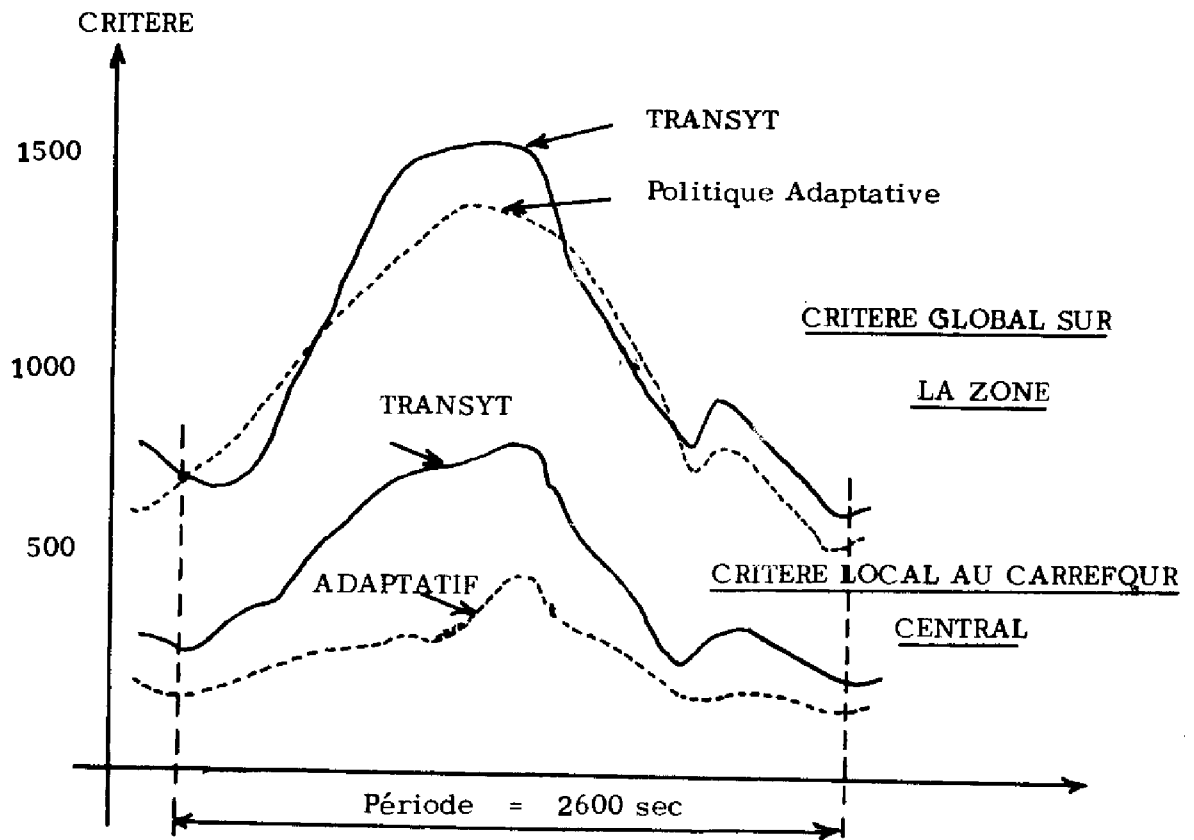
Pour chacune des configurations de trafic étudiée, nous avons mis en compétition trois politiques distinctes :

- La politique adaptative sans prise en compte du carrefour aval.
- La politique adaptative avec prise en compte du carrefour aval.
- La politique fixe optimale définie par TRANSYT.

Nous présentons un résumé de tous les résultats sans forme de tableau.

#### VI. 4. d) - Cas particulier du régime dynamique

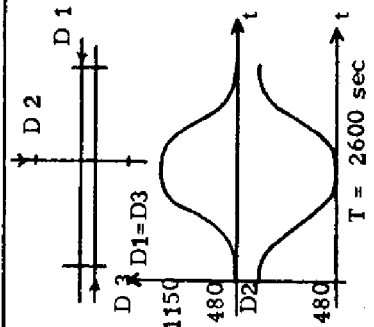
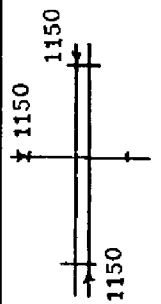
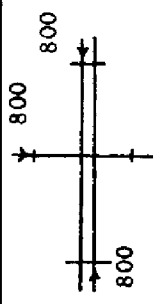
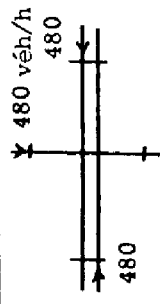
Il nous a paru intéressant de tester le comportement de l'algorithme adaptatif en régime dynamique. Pour cela, nous avons injecté dans le réseau des débits pulsés par le calculateur. Dans ce cas, la seule moyenne du temps d'attente sur la période n'est pas significative aussi nous y avons joint le tracé des variations du critère en fonction du temps.



- Fig. 65 -

Etude comparative en régime dynamique

POLITIQUE TESTEE	Politique Adaptative sans carrefour aval		Politique Adaptative avec carrefour aval		TRANSYT			BILAN Transyt et Politique Adaptative avec carrefour aval	
	Temps moyen d'attente au carref. à la pér.	Total	Temps moyen d'attente au carref. à la pér.	Total	Temps moyen d'attente au carref. à la pér.	Temps moyen d'attente au carref. à la pér.	Total	% d'amélioration LOCAL	% d'amélioration GLOBAL
	Moyenne sur la période		Moyenne sur la période		Moyenne sur la période				
CONFIGURATION DE DEBITS	480	619,2	172	594,8	316,4	352,2	668,6	45	11
	800	1146,1	392,1	1200,7	580,8	708,5	1289,3	32	6
	1150	1751,8	539,5	1722,6	882,5	962,1	1844,6	38	6
	Moyenne sur la période		Moyenne sur la période		Moyenne sur la période				
	287,2	1002,1	273,5	989,1	501	565,7	1066,7	45	7



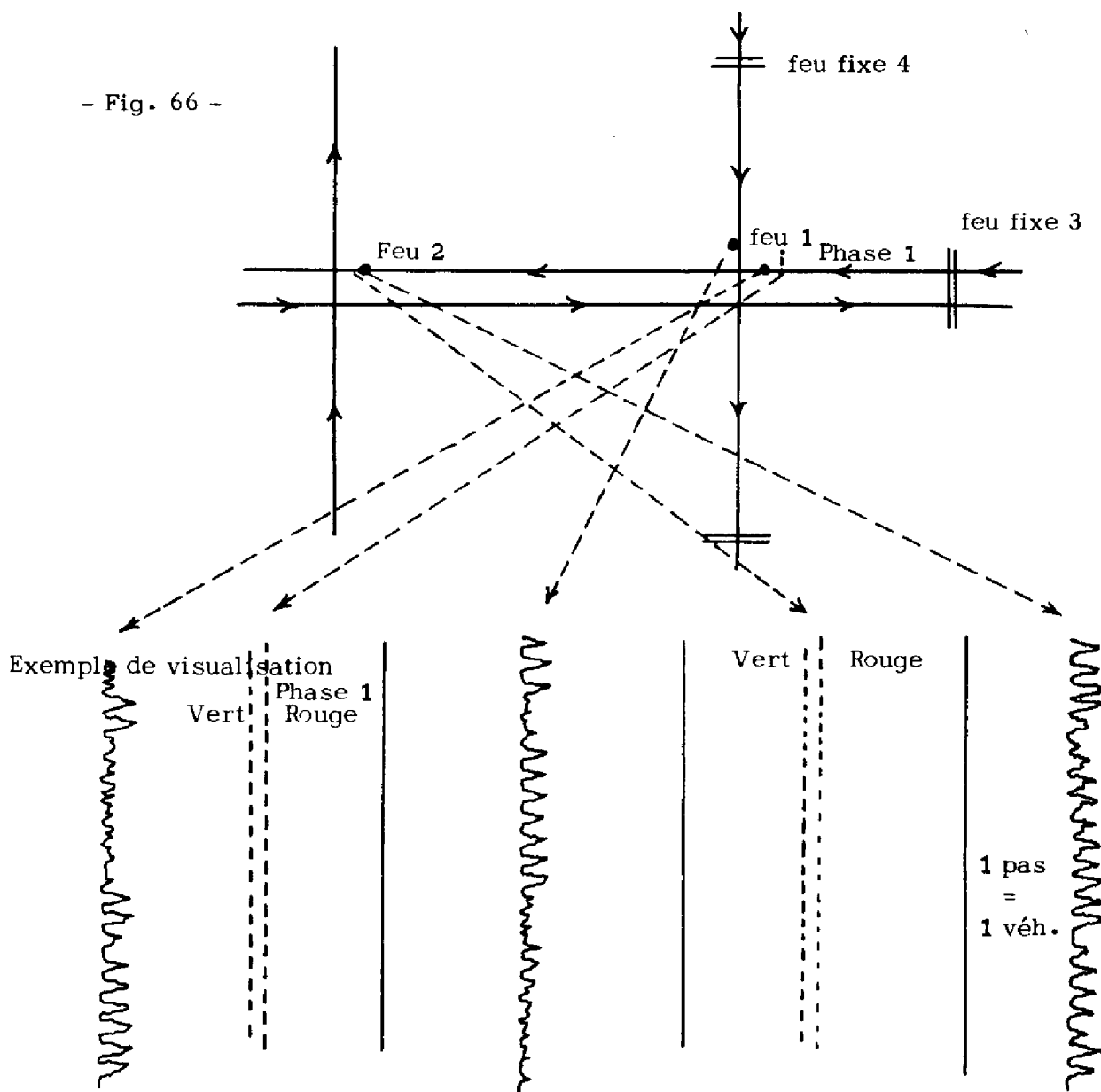
#### VI.4. e) - Interprétation des Résultats et bilan.

A la vue de ces résultats, il apparaît que le carrefour adaptatif apporte dans tous les cas sur l'ensemble du réseau un gain en temps d'attente de l'ordre de 6 % mais celui-ci est uniquement gagné très localement sur le carrefour piloté (gain local de 40 %). De plus, le fait de faire intervenir dans la décision le carrefour aval n'apporte pas, semble-t-il, des modifications considérables dans le comportement de l'algorithme.

---

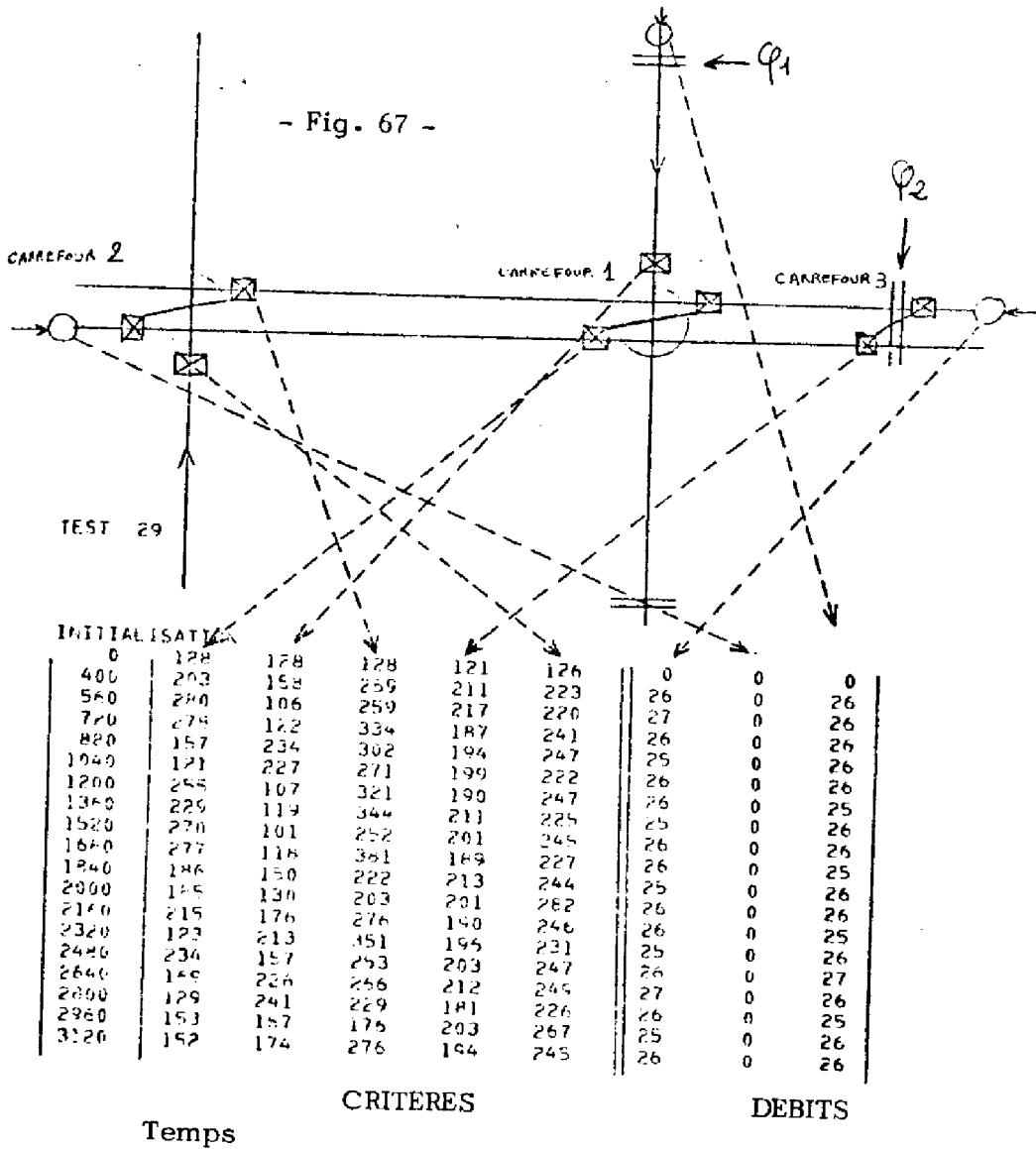
VI. 5) - ETUDE DE DEUX CARREFOURS ADAPTATIFS EN LIGNE

VI. 5. a) - Description du réseau et détail de la visualisation sur traceur 8 voies.





VI. 5. b) - Détail des divers points de mesure des critères



Pour ce réseau, nous avons étudié les critères temps d'attente aux carrefours 1, 2 et 3 (cycle fixe).

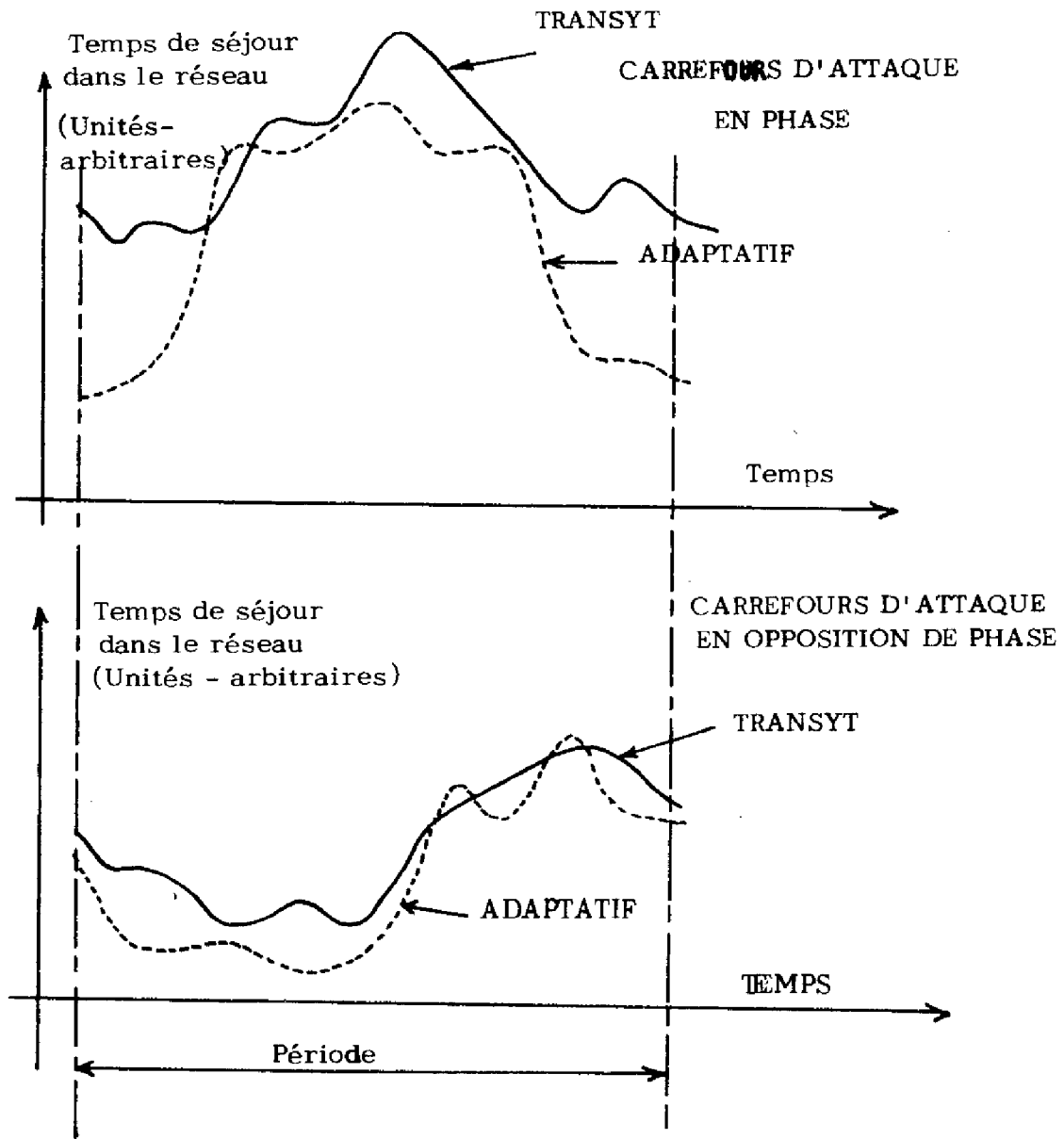
VI.5. c) - Présentation des Résultats.

Les moyennes des temps d'attente à ces différents carrefours sont présentées sous forme de tableau dans les deux cas suivants :

- 1) - Les carrefours  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont en phase.
- 2) - Les carrefours  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont en opposition de phase.

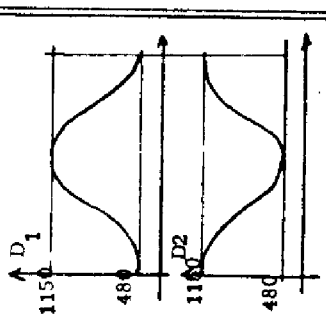
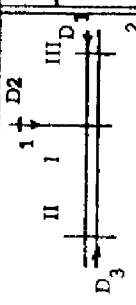
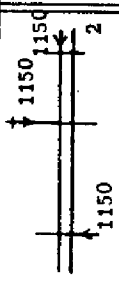
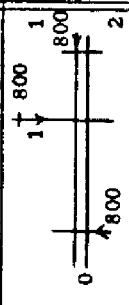
VI.5. d) - Cas particulier du régime dynamique

Le comportement de l'algorithme adaptatif en régime dynamique est satisfaisant comme en témoignent les deux courbes ci-dessus. A noter que lorsque les carrefours d'attaque sont en phase, il y a conflit inévitable au carrefour central ce qui se traduit par un critère assez élevé. Par contre, si les deux carrefours sont en opposition de phase, il y a une possibilité de concilier le passage des deux flux, ce qui est correctement décelé par l'algorithme adaptatif.



- Fig. 68 - = Comparaison des critères en régime dynamique

POLITIQUE TESTEE	POLITIQUE ADAPTATIVE SANS CARREFOUR AVAL				TRANSYNT				BILAN % Amélioration par rapport a TRANSYNT			
	CARREF. 1	CARREF. 2	CARREF. 3	TOTAL	CARREF. 1	CARREF. 2	CARREF. 3	TOTAL	CARR. 1	CARR. 2	CARR. 3	TOTAL
1 et 2 en opposition de phase. configuration de débits	134.6	277	136.7	548,3	136.4	292,6	138.6	567.6	1 %	5 %	1 %	3 %
	191.6	459	199.6	850.3	195.6	434.9	207.6	837.7	2 %	5 %	4 %	- 1 %
Moyennes sur la période	112.3	258.7	122.6	493.6	118.9	283.6	127.9	530.4	5 %	8 %	4 %	7 %
	Moyennes sur la période				Moyennes sur la période							





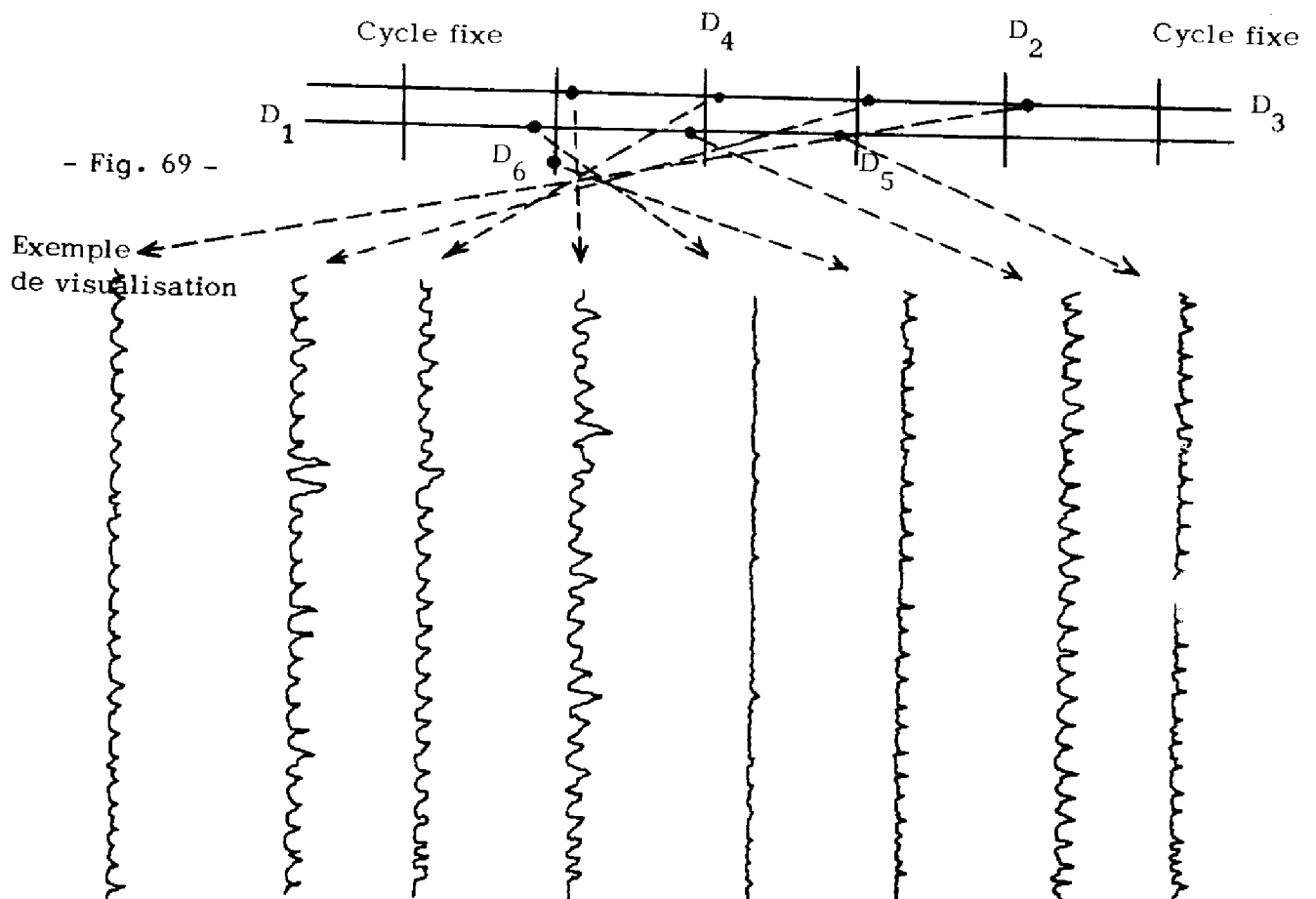
VI. 5. e) - Interprétation des résultats et bilan.

Les performances de l'algorithme adaptatif sur ce réseau de deux carrefours en ligne sont moins bonnes que pour le cas du carrefour isolé. Les raisons nous semblent en être les suivantes :

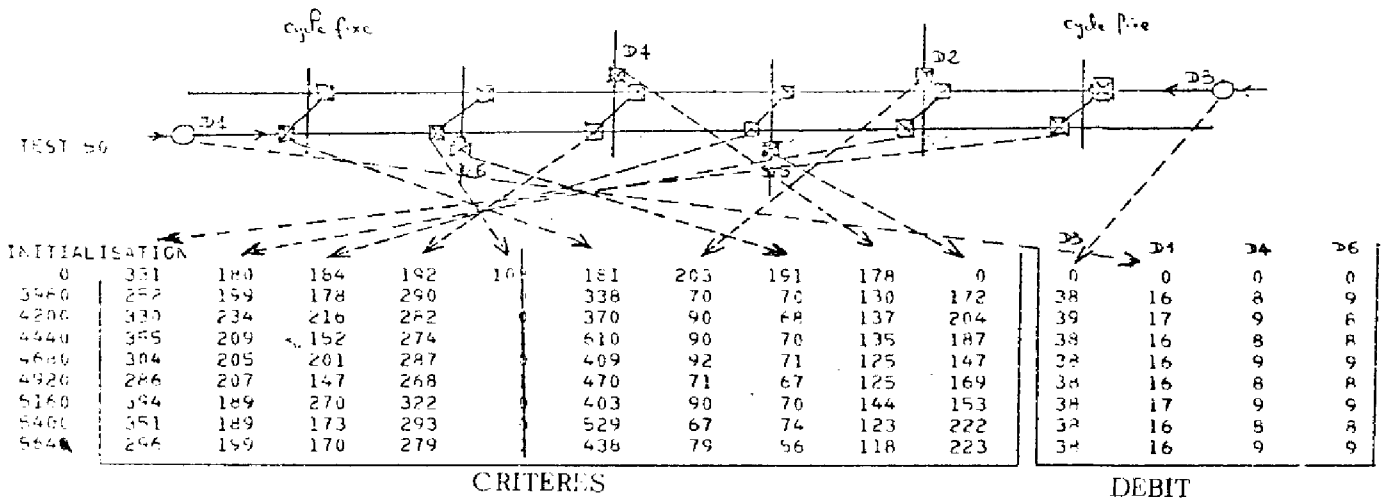
Dans le cas du carrefour isolé, les carrefours amonts étaient tous à cycle fixe et, de ce fait, il y avait peu d'erreurs de prédiction du trafic et des feux. Par contre, pour le réseau constitué de deux carrefours adaptatifs en ligne, le second carrefour n'est plus pulsé à cycle constant et, de ce fait, s'introduisent simultanément les deux erreurs d'estimation du trafic et des feux. La prédiction étant moins bonne, il se produit une dégradation de l'efficacité de notre méthode. Nous verrons que cette tendance s'accroît encore plus lors de l'étude de l'artère adaptative.

VI. 6. - ETUDE DE L'ARTERE ADAPTATIVE.

VI. 6. a) - Description du réseau et détail de la visualisation sur 8 voies.



VI. 6. b) - Détail des divers points de mesure des critères



- Figure 70 -

Pour ce réseau, nous avons dissocié le temps d'attente sur l'artère et celui sur les transverses. Notons qu'il n'y avait pas de tourne à droite ni à gauche sur les transverses.

VI.6. - c) - Présentation des résultats.

Les moyennes des temps d'attente sur l'artère et ses transverses sont présentées comme précédemment sous forme de tableau.

VI.6. - d) - Cas particulier du régime dynamique.

Les courbes ci-contre soulignent les insuffisances de la commande adaptative sur une artère. Même en régime dynamique, qui semblerait, a priori, favoriser l'adaptativité, TRANSYT est meilleur que notre régulation. (voir Interprétation des résultats et bilan).

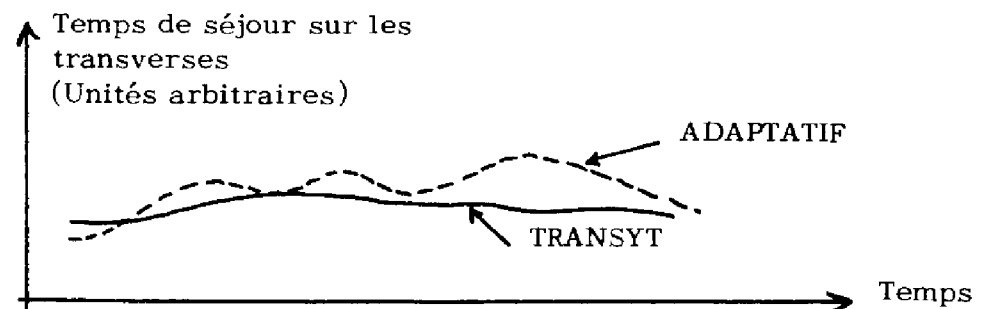
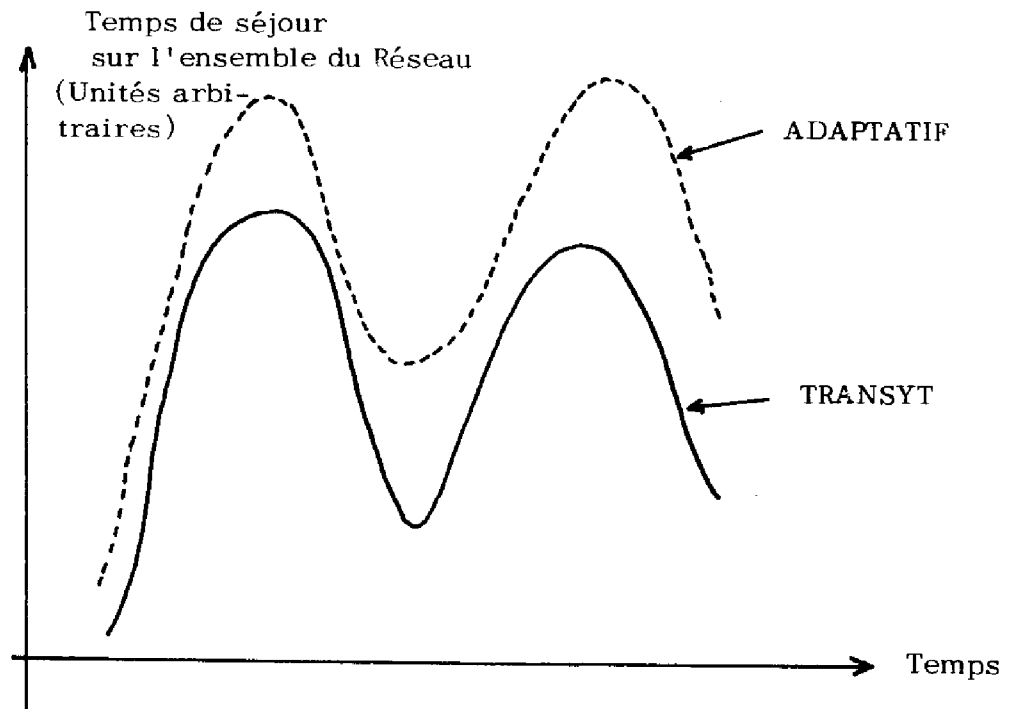
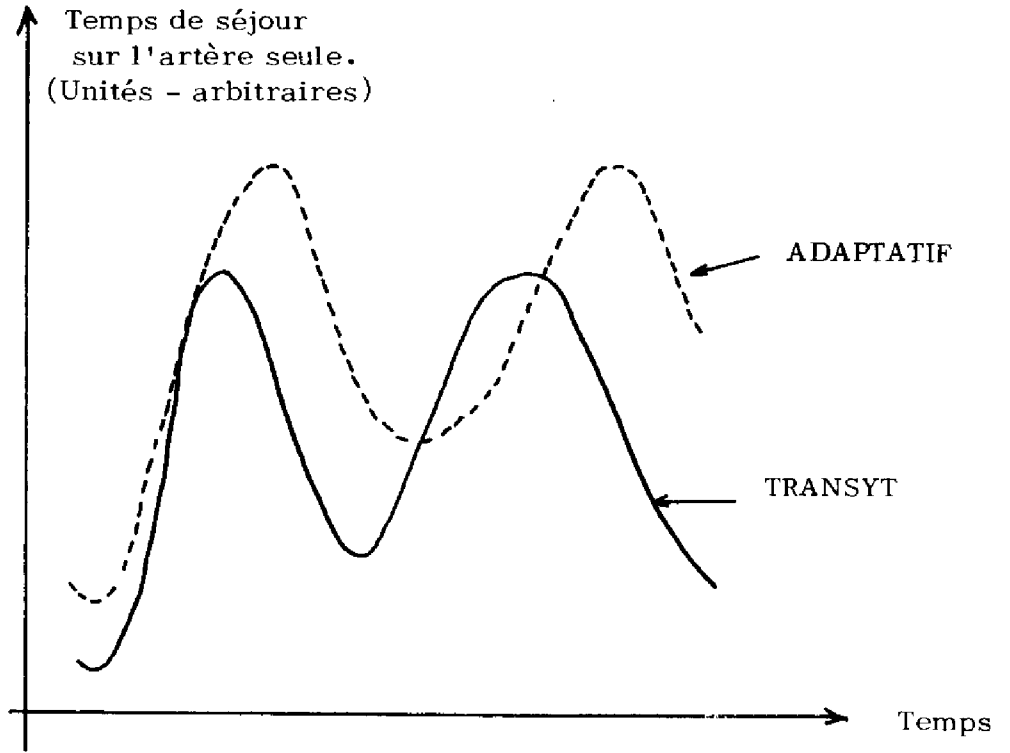


Figure 71 - Comparaison des critères en régime dynamique

CONFIGURATION DE DEBITS	POLITIQUE TESTEE			POLITIQUE ADAPTATIVE SANS CARREFOUR AVAL			TRANSYT			BILAN %		
	ARTERE	TRANSVERSES	TOTAL	ARTERE	TRANSVERSES	TOTAL	ARTERE	TRANSV.	TOTAL			
	1.499.4	282.8	1.782.2	1.245.6	279	1.524.6	- 20 %	- 1 %	- 17 %			
	1.291.5	249.5	1.541	1.401.8	257.5	1.659.5	8 %	3 %	7 %			
	1.465.8	242.8	1.708.7	1.484.8	269.8	1.754.7	1 %	10 %	2 %			
	Moyennes sur la période			Moyennes sur la période								
	1.287.7	242.4	1.530.2	1.119.6	202.6	1.322.3	- 15 %	- 19 %	- 16 %			



## VI. 7 ) - INTERPRETATION DES RESULTATS ET BILAN.

Il apparait clairement que, en moyenne, TRANSYT donne, sur l'artère, des résultats meilleurs que notre algorithme. Ceci nous semble être dû à deux raisons principales :

- Tout d'abord, l'estimation du trafic et des feux se faisant toujours avec le cycle de consigne (égal à 80 sec.) malgré les grandes variations possibles du cycle et du vert réel, il y a là une source d'erreur dont nous n'avons pas pu chiffrer les conséquences mais qui semble influencer beaucoup sur la performance totale du système.

- Ensuite, la façon dont nous avons levé l'indétermination provoquée par la présence de minima plats ne semble pas être la meilleure possible : nous aurions probablement eu de meilleurs résultats en calculant, en même temps, les politiques provoquant le nombre d'arrêts minimum. L'intersection de ces deux sous-ensembles de politiques nous aurait alors fourni une régulation meilleure pour de tels régimes.

Nous devons donc reconnaître que la politique adaptative que nous avons réalisée pour les régimes fluides présente certaines insuffisances au niveau de l'optimisation de la décision. Par contre, ce travail nous a permis de mettre au point un type de commande des feux par ordinateur qui nous semble pouvoir se prêter à un grand nombre de modèles de décision. Nous précisons, dans la conclusion générale, comment nous voyons une évolution possible de ces modèles.

---



## C H A P I T R E    V I I

### CONCLUSIONS SUR LA MESURE D'EFFICACITE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE ET PERSPECTIVES D'UNE COMMANDE CONCILIANTE MACRO ET MICRO-REGULATIONS.

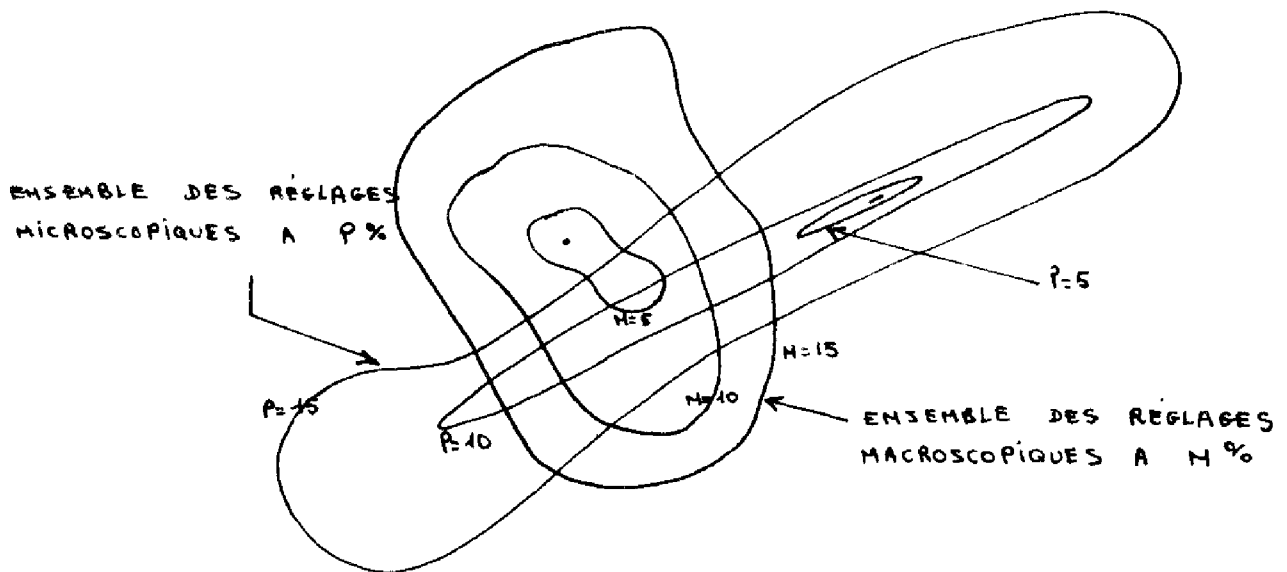
A la fin de cette étude sur l'efficacité de notre commande adaptative nous nous devons de constater que notre microrégulation est capable d'apporter localement une amélioration sensible (voir carrefour isolé) mais, par contre, est moins performante lorsqu'il s'agit de réguler les feux d'une zone plus étendue. Notons que, sur ce point, nous arrivons à la même conclusion que J. I. HOLROYD et D.I. ROBERTSON du Road Research Laboratory qui, en octobre 1972, ont fait part d'une étude comparative de différentes stratégies (Réf. 3) dans laquelle il apparaît que le système adaptatif testé (PLIDENT), avait, lui aussi, donné un temps d'attente plus long (de l'ordre de 30 %) que TRANSYT.

Si l'on se borne à ces résultats, la macrorégulation semblerait donc être la solution la meilleure dans la mesure où elle permet une planification plus efficace sur l'ensemble d'un réseau. Nous sommes donc tentés, actuellement, de tirer une telle conclusion mais nous ne la considérerons cependant pas comme définitive car l'accepter sans réserves reviendrait en effet à admettre que la connaissance des fluctuations locales du trafic est une information de peu d'intérêt qui ne permet pas d'améliorer la conduite d'ensemble des feux d'un réseau. Nous ne pouvons donc pas accepter globalement une telle conclusion qui est paradoxale. Notre sentiment est qu'il est nécessaire, dans la commande du trafic, de concilier les deux visions macroscopique et microscopique de ce processus.

Nous allons brièvement exposer de manière abstraite comment nous organiserions cette coexistence au sein d'un algorithme de contrôle.

Tout d'abord, la prise d'information serait identique à celle de la microrégulation présentée dans le chapitre précédent mais la macrorégulation travaillerait uniquement sur des valeurs prétraitées (moyennes, lissages, etc...)

A chaque exécution, les programmes d'optimisation macroscopique et microscopique seraient sollicités non pas pour obtenir un réglage optimum unique, mais pour nous fournir les ensembles des réglages s'approchant de cet optimum à N % et P %.



- Figure 72 -

Essai de détermination d'un réglage conciliant  
macro et micro régulations

L'étude de la sensibilité et de la convergence du modèle macroscopique, avec, en particulier, la mise en évidence de nombreux minimums plats nous invite à penser que l'ensemble des réglages à N % aura un nombre d'éléments croissant très vite avec N. Nous pouvons également penser qu'il en sera de même pour l'ensemble des réglages du modèle microscopique puisque les structures de ces deux modèles sont identiques et que seules varient les informations d'entrée.

Ce qui reste à définir, et nous ne prendrons pas ici position, est de savoir quelle doit être la logique permettant de trouver le réglage unique,

c'est-à-dire quel doit être le jeu des priorités d'un ensemble sur l'autre. Dans ce domaine, il serait prématuré de se prononcer et nous pensons que seule une expérimentation sur un modèle permettra de conclure.

---



## CONCLUSION GÉNÉRALE

Il nous semble indispensable, dans cette conclusion, de situer notre travail par rapport aux autres études menées à l'extérieur du Laboratoire. Le nombre des stratégies de contrôle conçues par l'homme étant considérable, il est très difficile de les représenter toutes ; cependant, de grandes classes apparaissent si l'on convient de s'en tenir aux deux caractéristiques suivantes : le mode d'intervention du calculateur (on line, off line) et le degré de liberté du cycle. Dans un tel système d'axes, chaque stratégie peut grossièrement être positionnée. Nous représentons ci-dessous quel a été le cheminement et l'avancement de nos travaux par rapport aux stratégies les plus connues. (Pour la définition exacte de chacune de ces politiques, nous renvoyons à l'article de J. Holroyd et D.I. Robertson : "Stratégies for area traffic control Systems : present and future").

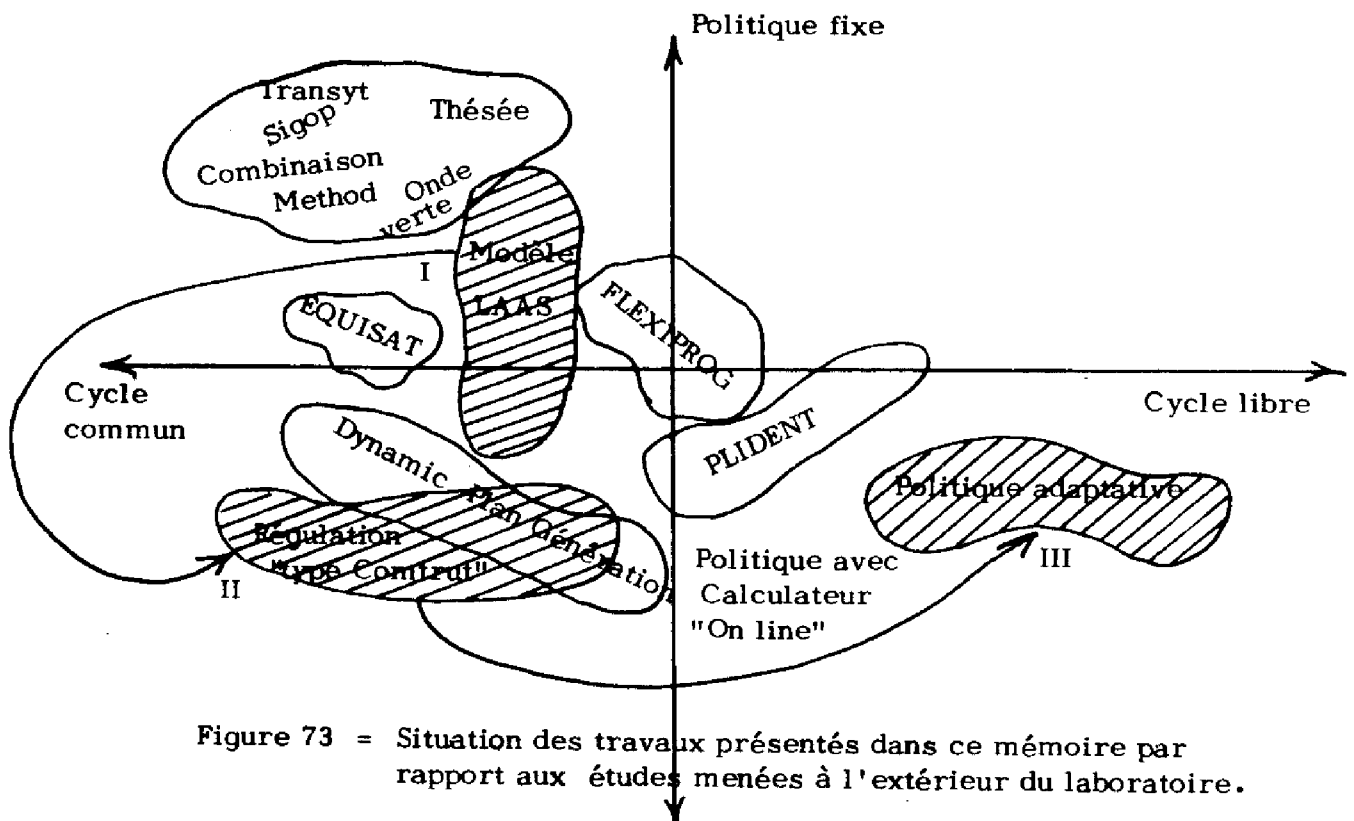


Figure 73 = Situation des travaux présentés dans ce mémoire par rapport aux études menées à l'extérieur du laboratoire.

Figurent hachurées sur ce schéma les trois grandes étapes développées dans ce mémoire.

- la mise au point d'un modèle numérique de simulation opérationnel en temps réel.
- sa mise en oeuvre sur un petit calculateur pour l'obtention d'un plan de coordination en temps réel.
- la réalisation d'une commande adaptative et prédictive.

A la fin de chacune de ces réalisations, les performances obtenues pour des régimes fluides ont été comparées avec celles d'une politique fixe calculée "off-line". Paradoxalement, c'est, jusqu'à ce jour, cette dernière qui s'est avérée être la meilleure.

Ces résultats nous laissent penser qu'une bonne stratégie pour de tels régimes d'écoulement ne doit pas se contenter d'une seule vision macroscopique ou microscopique mais concilier ces deux aspects. Nous avons appréhendé une façon de réaliser ce compromis mais la mise en oeuvre, qui risque d'être délicate, reste encore à entreprendre.

---



## BIBLIOGRAPHIE

- (1) - SERC - "Dispositifs électroniques adaptés à la gestion des infrastructures routières et à la régulation du trafic"  
Rapport D.G.R.S.T., n° 67 00 629, (1968)
- (2) - AUTHIE G., GIRAUD A.  
"Manuel d'utilisation du simulateur de trafic urbain"  
Note interne L.A.A.S. - n° 723, (1970)
- (3) - HOLROYD J., ROBERTSON D.I.  
"Strategies for Area Traffic Control Systems Present and future"  
Second International Symposium on area traffic Control systems.  
O.C.D.E. - October 1972.
- (4) - GARTNER M., SHAMI A., SEM URI J.  
"Computer aided coordination strategy for traffic signal networks"  
1er Symposium international sur la régulation du trafic.  
Versailles - 1970
- (5) - MARTIN B.V., WOHL M.  
"Traffic System Analysis for engineers and planners"  
Mac graw-Hill Book - company, (1967)
- (6) - DUNNE MC. , POTTS R.B.  
"Algorithm for traffic control"  
Opns. Res. 12, (1964), 870-881.
- (7) - KAUFMANN A.  
"Méthodes et modèles de la Recherche opérationnelle"  
Tome 2 - Dunod 1962.
- (8) - DOMENECH - PUIG SERRA C.  
"Analyse des capteurs inductifs de trafic. Application à détection des variables caractérisant le trafic urbain".  
Thèse de Docteur-Ingénieur - U.P. Sabatier - n° 347-1972
- (9) - GIRAUD A. - RUMEAU R.  
"Algorithme d'optimisation en temps réel des décalages d'un réseau non maillé".  
Rapport de fin d'études de recherches.  
Publication n° 880-B-1972.

- (10) - AUTHIE G.  
"Réalisation d'un simulateur hybride de trafic urbain et son utilisation pour les méthodes de conduite du trafic à cycle fixe"  
Thèse de Docteur-Ingénieur - U.P. Sabatier n° 318 - 1971
- (11) - CHAR J.P.  
"Generation of trees, two trees, and storage of master-forests".  
I.E.E.E. - Transactions on circuit theory -  
vol. C.T. 15, n° 3, sept. 1968
- (12) - GAZIS D.C.  
"Traffic flow and control - theory and applications"  
unpublished Paper.
- (13) - MORGAN J.T. - LITTLE J.D.C.  
"Synchronizing Traffic signals for maximum bandwidth"  
Opns. Res. 12, (1964), 896-912
- (14) - GIRAUD A., LEGLISE M., RUMEAU R.  
"Etude de la commande optimale du trafic"  
Compte-rendu de fin de contrat d'une recherche financée par la  
Délégation générale à la recherche scientifique et technique.  
Contrat n° 69 - 01 - 840-01.
- (15) - A.J. MILLER  
"A computer control system for traffic networks".  
Presented at the second international symposium on the theory  
of traffic flow, London 25-27 Juin 1963.
- (16) - HILLIER J.A.  
"The glasgow experiment : Schemes and equipment"  
Road Research Laboratory, Report L.R. 95, (1967)
- (17) - ROSEMBLOOM A., KESSMANN Roy. W.  
"Control strategies of the traffic adaptive network signal timing  
program".  
Prepared for the second international symposium on area traffic  
control systems .  
O.C.D.E. - octobre 1972.
-

A N N E X E

DE SCRIPTION D'UNE CHAINE D'ACQUISITION  
SEMI-AUTOMATIQUE PERMETTANT L'ANALYSE D'UNE  
SITUATION DE TRAFIC

---



DESCRIPTION D'UNE CHAÎNE D'ACQUISITION SEMI-AUTOMATIQUE  
PERMETTANT L'ANALYSE D'UNE SITUATION DE TRAFIC

Nous avons déjà rapidement présenté cette chaîne de mesure à l'occasion de la validation de l'écoulement des véhicules par bandes (chapitre III) mais nous pensons qu'il est intéressant de montrer plus en détail quelques exemples d'applications de cet outil en espérant que, par sa souplesse et sa simplicité, il intéressera de nombreux ingénieurs de trafic soucieux d'étudier sur site la qualité de leur régulation.

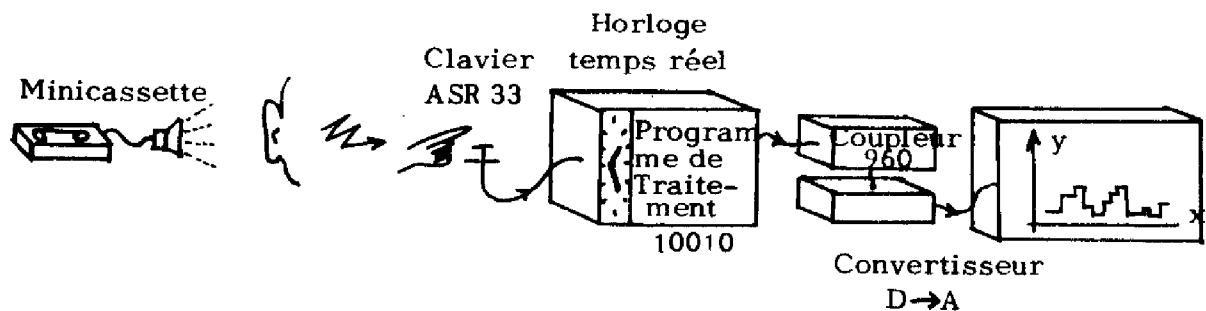
DESCRIPTION GENERALE

L'utilisation de cette chaîne s'effectue en deux étapes :

- Sur site, enregistrement des phénomènes.
- Dépouillement en laboratoire.

Mesures sur site. - Sur site, un ou plusieurs observateurs, munis chacun d'une minicassette, prélèvent l'information qui les intéresse et la mémorisent sur les bandes magnétiques préalablement synchronisées. L'information est généralement le passage d'un véhicule, le changement d'état d'une phase, ou toute autre commentaire destiné à simplifier le dépouillement ultérieur de la bande.

Dépouillement. - La ou les bandes ainsi enregistrées sont ensuite traitées au moyen d'un banc de dépouillement "temps réel" dont nous précisons ci-contre la configuration.

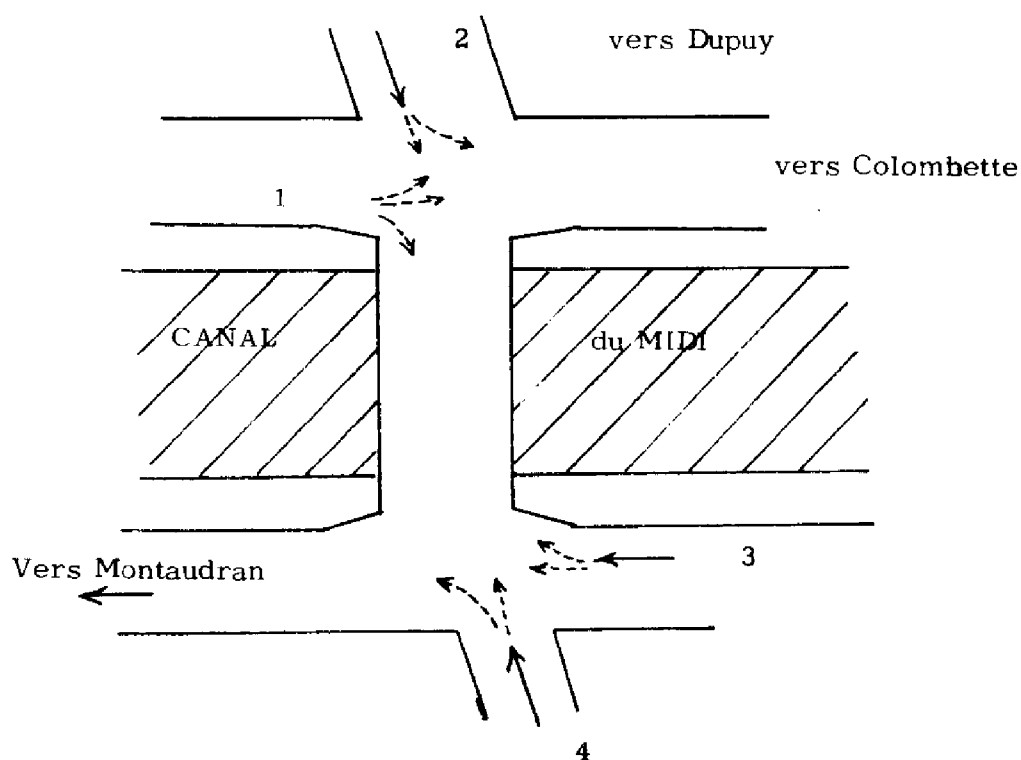


- Figure 74 -

Description de la chaîne d'acquisition

EXEMPLE D'ETUDE : Mise en évidence du mauvais fonctionnement d'un carrefour en heure de pointe.

Cette étude a été réalisée par deux observateurs au carrefour Guilleméry de la ville de Toulouse : nous en présentons un schéma descriptif.

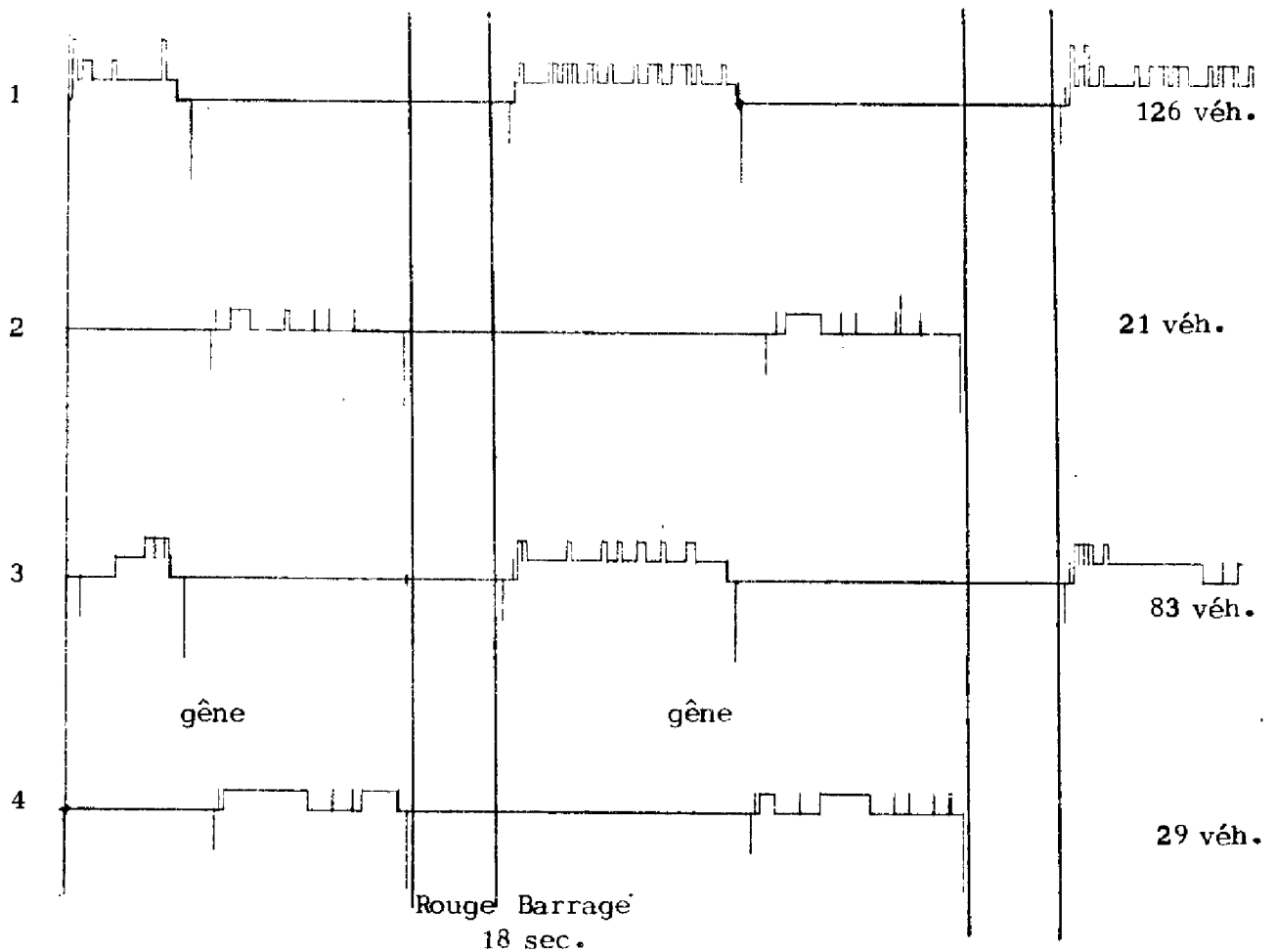


Carrefour Guilleméry

- Figure 75 -

Description du réseau analysé.

Résultats : Très rapidement ( 5 mn de mesures sur site, 15 mn de dépouillement), nous avons obtenu le diagramme de fonctionnement présenté ci-dessous qui laisse apparaître l'existence d'un rouge barrage excessif de 18 secondes.



- Figure 76 -

Diagramme espace-temps obtenu

Remarque : La chute de débit survenant pendant le vert de la phase 4 est due aux interactions entre les véhicules tournant à droite de la phase 3 et ceux allant tout droit de la phase 4. Une telle information se transmet sous forme de commentaire et permet d'expliquer la faiblesse du débit de la phase 4 alors que la queue sur cette voie était ce jour là très importante.

Ce rouge intégral est prévu pour le dégagement du pont mais notre analyse permet d'affirmer que, à l'heure de la mesure (08 h), un tel rouge n'est pas justifié.

Sur cet exemple, nous voyons comment il est possible, en quelques minutes, de "photographier" l'état d'un carrefour et de diagnostiquer les causes d'un mauvais fonctionnement.

Le programme de dépouillement nous permet également de mesurer le nombre de véhicules passés pendant le vert de chaque phase, ce qui nous donne une indication sur le taux d'utilisation du vert et nous permet de modifier le split en conséquence.

Notons que cet outil de mesure a été plusieurs fois utilisé au cours de nos travaux, en particulier pour l'étude de la périodicité du passage des pelotons à la sortie d'un feu (chapitre II), puis, sous des formes plus complexes, pour la mesure des temps de parcours des véhicules et pour l'analyse des phénomènes transitoires générés par les rattrapages de coordination sur une artère. D'ailleurs, de nombreuses autres applications sont encore possibles comme, par exemple, la vérification du bon fonctionnement d'un organe de captation et son étalonnage.

Cette méthode d'acquisition de données, peu coûteuse et très souple, nous semble constituer un outil pratique permettant le contrôle mobile de la qualité d'une régulation ainsi que du matériel qui la réalise.

---