



HAL
open science

La régulation des accès : un outil pour l'exploitation des voies rapides urbaines

J. P. Mizzi

► **To cite this version:**

J. P. Mizzi. La régulation des accès : un outil pour l'exploitation des voies rapides urbaines. [Rapport de recherche] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). 1997, 145 p., figures, bibliographie page 137 à 150. hal-02165593

HAL Id: hal-02165593

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02165593>

Submitted on 26 Jun 2019

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.

rapport d'étude

La régulation des accès

**Un outil pour
l'exploitation des
voies rapides urbaines**

décembre 1997

Centre d'études sur les réseaux, les transports,
l'urbanisme et les constructions publiques

NOTICE ANALYTIQUE

Organisme commanditaire :

DSCR : Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière.

Arche de la défense Paroi sud Tel : 01.40.81.80.86 Fax : 01.40.81.81.99

Titre :

La régulation des accès

Sous-titre : Un outil pour l'exploitation des voies rapides urbaines

Langue : Français

Organisme auteur

CERTU : Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Rédacteurs ou coordonateurs

JP. MIZZI (Département Systèmes Techniques pour la Ville)

Date d'achèvement

Décembre 1997

Remarques préliminaires :

Ce rapport doit être considéré comme un rapport s'insérant dans un corpus technique relatif au schéma directeur d'exploitation de la route.

Résumé :

La régulation des accès autoroutiers est un outil à la disposition des exploitants des voies rapides urbaines. Cependant cette technique, bien que largement utilisée outre-Atlantique, est sous-exploitée en France et n'y dispose pas d'une grande notoriété. La régulation des accès n'est pas un moyen magique: il ne s'agit que d'un outil complémentaire parmi les quelques outils à la disposition d'un exploitant visant à assurer la mission de *gestion du trafic*.

La finalité du document est de fournir aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants de voies rapides quelques éléments de réponse aux questions suivantes : *pourquoi réguler ? quand et où réguler ? comment réguler ?* Il ne prétend pas être exhaustif sur le thème de la régulation des accès.

Cependant ce document a pour objectif de faire un premier tour du sujet, en présentant des techniques anciennes et éprouvées, des techniques plus récentes issues de la recherche, des problèmes concrets de mise en oeuvre, le tout illustré d'exemples de dispositifs opérationnels en France et à l'étranger.

Après avoir présenté le contenu du document dans le premier chapitre, le second chapitre présente les grands thèmes de la problématique de l'exploitation des voies rapides urbaines.

Le troisième chapitre introduit la régulation des accès avec une vision généraliste : un tour d'horizon de son utilisation dans le monde (de ce que nous en connaissons), les différentes méthodes possibles et leur impact sur le trafic.

Le quatrième chapitre présente différentes méthodes de régulation adaptative, c'est à dire la régulation qui s'adapte aux variations des conditions de circulation.

Le cinquième chapitre décrit un certain nombre de problèmes concrets de mise en oeuvre.

Le sixième chapitre présente des exemples de solutions techniques opérationnelles allant des solutions techniques les plus simples, aux plus élaborées.

Le septième dresse une conclusion générale et indique les suites envisagées.

Mots clés :

Crise, Exploitation, Gestion, Route, Schéma Directeur

Diffusion :

Limitée, subordonnée à accord du département Systèmes Techniques pour la Ville

Nombre de pages :

145 pages

Prix :

75 FF

Confidentialité :

Non

Bibliographie :

Non

Nous remercions tous ceux qui ont participé au groupe de travail, à la rédaction, à l'illustration ou à la relecture de ce document.

Nos remerciements vont également à toutes les personnes qui ont fourni des documents d'illustrations et apporté leurs conseils.

La rédaction de ce document a été réalisée à partir des contributions des personnes suivantes :

Mme. GUICHARD	DSCR	M. GARDES	CERTU
M. DAMAS	CETE de Lyon	M. MIZZI	CERTU
M. OLIVERO	CETE Sud-Ouest	M. LANCELIN	SRILOG

La conduite du groupe de travail et la synthèse de cet ouvrage ont été effectuées par Jean-Paul MIZZI du Département Systèmes Techniques pour la Ville, groupe Transports au CERTU

SOMMAIRE

SOMMAIRE	1
I. CONTENU DU DOCUMENT	5
II. L'EXPLOITATION DES VOIES RAPIDES URBAINES : PROBLEMATIQUE ET OUTILS	9
II.1. Le développement des réseaux de voies rapides urbaines	9
II.2. La problématique des réseaux de V.R.U.	10
A. La demande de déplacement	10
B. Les perturbations	12
II.3. L'exploitation : enjeux et domaines	16
A. Enjeux de l'exploitation des voies rapides urbaines	16
B. Les domaines de l'exploitation	17
II.4. Les missions pour l'exploitation des V.R.U.	20
A. La connaissance du trafic	20
B. L'information des usagers	21
C. La détection et le traitement des incidents	22
D. La régulation du trafic	25
E. D'autres missions et d'autres outils...	26
III. LA REGULATION DES ACCES : PRESENTATION GENERALE	29
III.1. La carte de son utilisation	29
A. Aux Etats-Unis	29
B. Au Japon	31
C. En Europe	32
D. En France	33
III.2. Les objectifs de la régulation des accès	33

III.3. Un exemple de calcul de gain	37
III.4. Les méthodes pour réguler un accès	42
A. L'aménagement de l'accès	43
B. La régulation par barrière	45
C. La régulation par feux - Différentes stratégies	46
III.5. Les effets sur le trafic	50
A. Effets sur la Voie Rapide Urbaine	51
B. Effets sur le réseau de surface	53
IV. LES STRATEGIES DE REGULATION ADAPTATIVES	57
IV.1. Les stratégies locales	57
A. Stratégie Demande Capacité Standard (DCS)	57
B. Stratégie Demande Capacité INRETS (DCI)	59
C. Stratégie Taux d'occupation	60
D. Stratégie anglaise de Wotton & Jeffreys (W&J)	63
E. Stratégie hollandaise du Rijkswaterstaat (RWS)	65
F. Stratégie ALINEA	67
IV.2. Présentation des stratégies coordonnées	69
A. La coordination	69
B. Stratégie hollandaise du Rijkswaterstaat synchronisée (RWS COR)	70
C. Stratégie ALINEA synchronisée	71
D. Stratégie METALINE	74
E. D'autres stratégies coordonnées	75
V. LA MISE EN OEUVRE DE LA REGULATION PAR FEUX	77
V.1. Le calcul des cycles de feux d'une stratégie adaptative	77
V.2. La gestion des files d'attente aux accès	80
V.3. La prise en compte des accès à bretelles multiples	83
A. Présentation du problème	83
B. Etude comparative des deux solutions	85
V.4. Les équipements de terrain et la signalisation utilisables	86

A. Présentation	86
B. Equipements de signalisation	87
C. Equipements de présignalisation	89
D. Equipements de prescription	90
E. Equipements de détection	91
F. Equipements pour l'information des usagers	92
V.5. Le contrôleur d'accès	92
A. Caractéristiques fonctionnelles d'un contrôleur d'accès	92
B. Utilisation d'un contrôleur de carrefour	96
C. La sécurité des contrôleurs d'accès	98
V.7. Eléments d'architecture des systèmes	100
A. Un système local isolé	100
B. Un système régional centralisé	101
C. Un système régional décentralisé	102
VI. DES SOLUTIONS OPERATIONNELLES	103
VI.1. Une régulation par barrière : l'affectation de trafic à la porte de St Cloud.	103
A. Contexte	103
B. Description	104
C. Sécurité	104
D. Signalisation	105
E. Conclusion	105
VI.2. Une régulation par barrières automatiques : le cas de Lyon	105
A. Le site	105
B. Objectifs	107
C. Méthodes	107
D. Equipements d'information et de sécurité	107
E. Conséquences	108
VI.3. Une régulation isolée par feux fixes : le cas du pont de Nogent	109
A. Contexte	109
B. Description	110
C. Signalisation	111
VI.4. Un système de régulation d'accès : le cas de L'Ile de France	111

A. Présentation et objectifs	111
B. Les équipements de terrain	112
C. Le système informatique central	113
D. Le fonctionnement : la commande des feux	114
E. La télécommande	115
F. Conclusion	116
VI.5. Un système de régulation adaptative : Le cas d'Amsterdam	116
A. Présentation et objectifs	116
B. Méthode de régulation	117
C. Techniques de communication	120
VI.6. Un autre dispositif technique de régulation adaptative envisageable	121
A. Présentation et objectifs	121
B. Solution technique	122
VII. PERSPECTIVES	125
VIII. CALCUL THEORIQUE	129
IX. GLOSSAIRE	133
X. REFERENCES	137

I. CONTENU DU DOCUMENT

La régulation des accès : une technique souvent efficace mais méconnue

Selon le glossaire « 503 mots pour l'exploitation de la route » publié par le SETRA, la régulation d'accès est une technique de régulation du trafic d'une infrastructure routière consistant à agir sur le débit de véhicules entrant sur une section au moyen de signaux appropriés ou de barrières physiques.

La régulation des accès autoroutiers est un outil à la disposition des exploitants des voies rapides urbaines permettant, avec d'autres, de faire face à l'accroissement constant du trafic routier dans les zones périurbaines. Cependant cette technique, bien que largement utilisée outre-Atlantique, est sous-exploitée en France et n'y dispose pas d'une grande notoriété.

La régulation des accès n'est pas un moyen magique qui a pour effet de régler tous les problèmes de congestion des voies rapides : il ne s'agit que d'un outil complémentaire parmi les quelques outils à la disposition d'un exploitant visant à lui permettre d'assurer l'une de ses missions essentielles : *la gestion du trafic*. C'est cependant l'un des rares outils offrant les moyens d'une action dynamique directe sur le trafic des voies rapides.

Bien utilisée elle permet, dans de nombreux cas, d'améliorer les conditions de circulation sur les voies rapides, comme l'ont montré les nombreuses expériences françaises et surtout étrangères. Elle se traduit :

- pour l'utilisateur dont le trajet emprunte la voie rapide régulée, par une réduction de son temps de trajet global;
- pour l'exploitant, par un accroissement du débit écoulé : c'est à dire un meilleur rendement de son infrastructure ;
- pour la collectivité, par la réduction des conflits d'insertion et donc des accidents aux niveaux des accès : c'est à dire globalement par une amélioration de la sécurité.

Les techniques de régulation sont diverses et peuvent toutes produire des effets bénéfiques :

- du simple aménagement physique d'un accès : lignes continues, zones hachurées, balisettes,
- en passant par la mise en place de barrières amovibles,
- l'installation d'un feu isolé,
- jusqu'à l'intégration de la régulation d'accès comme fonction intrinsèque d'un Système d'Aide à la Gestion de Trafic (SAGT) gérant le réseau de voies rapides.

Ce document : un tour d'horizon à l'usage des exploitants

La finalité de ce document est de fournir aux maîtres d'ouvrage et aux exploitants de voies rapides quelques éléments de réponse aux questions principales suivantes :

- ***pourquoi réguler ?***
- ***quand et où réguler ?***
- ***comment réguler ?***

Il ne prétend pas être exhaustif sur le thème de la régulation des accès : l'exploitation des voies rapides est un domaine relativement nouveau, en évolution rapide avec une bibliographie qui ne reflète que partiellement la grande quantité d'expériences individuelles menées sur le terrain, qu'il est impossible de recenser systématiquement.

Cependant ce document a pour objectif de faire un premier tour du sujet, en présentant des techniques anciennes et éprouvées, des techniques plus récentes issues de la recherche, des problèmes concrets de mise en oeuvre, le tout illustré d'exemples de dispositifs opérationnels en France et à l'étranger.

De la théorie....

Le deuxième chapitre présente les grands thèmes de la problématique de l'exploitation des voies rapides urbaines : l'accroissement de la demande, les congestions récurrentes, les incidents, les interactions de la V.R.U. avec le réseau de surface ainsi que les

différents moyens à la disposition des exploitants : la supervision du trafic, l'information des usagers, la gestion des incidents, la régulation du trafic, le guidage, l'analyse du trafic a posteriori, la prévision...

Le troisième chapitre introduit la régulation des accès avec une vision généraliste : un tour d'horizon de son utilisation dans le monde (ou tout au moins de ce que nous en connaissons), les objectifs de la régulation d'accès, les différentes méthodes possibles et leur impact sur le trafic ...

Le quatrième chapitre présente différentes méthodes de régulation adaptative, c'est-à-dire la régulation qui s'adapte aux variations des conditions de circulation...

.....A la pratique

Le cinquième chapitre décrit un certain nombre de problèmes concrets de mise en oeuvre qu'il est bon d'avoir à l'esprit pour mettre en place un système de régulation adaptative : la prise en compte des remontées de file d'attente, la gestion des accès multiples, des architectures techniques possibles pour un système opérationnel de régulation, les équipements de terrains en particulier les contrôleurs, la signalisation...

Le sixième chapitre présente des exemples de solutions techniques opérationnelles allant des solutions techniques les plus simples, aux plus élaborées.

Le septième chapitre dresse une conclusion générale et indique les suites envisagées.

Un document pour demain....

Dans les toutes prochaines années, un certain nombre d'expérimentations significatives vont voir le jour, en particulier initiées à l'occasion du 4^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement européen. Par ailleurs, on peut penser qu'un bon nombre d'initiatives locales en la matière vont être prises et concourir à ce que cette technique fasse partie, à part entière, du panel des outils de gestion du trafic à la disposition des exploitants français.

Ce document n'a d'autre objectif que d'initier cette diffusion et d'apporter ainsi sa contribution à l'amélioration des conditions de circulation dans notre environnement périurbain.

II. L'EXPLOITATION DES VOIES RAPIDES URBAINES : PROBLEMATIQUE ET OUTILS

II.1. LE DEVELOPPEMENT DES RESEAUX DE VOIES RAPIDES URBAINES

Les V.R.U : un développement récent

Depuis les années 60, d'importants investissements ont été réalisés pour la construction de nouvelles infrastructures routières dans les pays les plus industrialisés. Parmi ces infrastructures routières mises en service progressivement, on voit naître, se développer et s'organiser en réseau maillé des voies rapides urbaines et périurbaines dans les grandes agglomérations françaises et étrangères. Ces réseaux sont réalisés pour satisfaire ou faciliter les déplacements des personnes et des biens à l'intérieur des grandes métropoles, pour maintenir et promouvoir les fonctions de ces agglomérations et pour assurer des liaisons rapides avec les autres grandes métropoles adjacentes.

Des réseaux en croissance forte et rapide

A titre d'exemple on peut citer en France : Paris, Lyon, Marseille, Toulouse, Bordeaux, Lille qui ont vu se développer un réseau dense de voies rapides urbaines ainsi que de nombreuses autres villes qui se sont équipées de rocade. A l'étranger, citons Tokyo, New York, Los Angeles, Londres... Ainsi, le réseau parisien de voies rapides est passé de 29,5 km en 1960 à près de 700 km en 1996 ; la rocade de Toulouse est passée de 3 km en 1970 à 32 km en 1988, et le réseau de Tokyo qui ne comptait que 4,5 km en 1962, comprenait plus de 290 km de voies rapides en 1990.

Une nouvelle organisation du réseau en mailles

Outre leur taille, ces réseaux ont évolué dans leur structure. On peut résumer leur développement en deux étapes :

- La première est marquée par la formation des voies radiales et circulaires sans maillage,

- La deuxième se caractérise par le maillage progressif avec la construction des rocares.

Ainsi, on voit apparaître des structures plus complexes (rocares) qui permettent non seulement de satisfaire convenablement des déplacements mal assurés par le passé (de banlieue à banlieue), mais modifient aussi fondamentalement leur structure et leur exploitation.

De la nécessité d'une exploitation durable et optimale du réseau

Ainsi dans certains cas, il existe désormais plusieurs itinéraires possibles d'une origine à une destination sans quitter le réseau de voies rapides ; ainsi l'usager peut modifier son itinéraire en fonction des conditions de circulation qu'il rencontre sur son trajet et l'exploitant peut affecter le trafic en temps réel selon la charge du réseau. Toutefois ce maillage rend plus complexe l'exploitation par les reports rapides de trafic d'une maille à l'autre.

Aujourd'hui et durablement, les voies rapides urbaines et périurbaines constituent un investissement considérable dont la bonne utilisation recouvre des enjeux économiques et sociaux importants.

II.2. LA PROBLEMATIQUE DES RESEAUX DE V.R.U.

A. La demande de déplacement

Un accroissement constant de la demande de déplacement

Les grandes agglomérations connaissent un très fort accroissement de la demande de déplacement qui entraîne, provoque un accroissement du trafic sur les voies rapides urbaines. Ceci se traduit par une augmentation du volume de circulation, un accroissement de la durée des pointes de trafic du matin et du soir et par une densification du trafic durant les heures creuses. De plus, les débits importants constatés sur les voies rapides provoquent rapidement des congestions dès le moindre incident survenant sur la

chaussée et il devient de plus en plus difficile de neutraliser une voie, le jour, pour un chantier d'entretien, sans engendrer aussitôt, des congestions significatives.

Ainsi selon les statistiques de la DREIF¹, de 1979 à 1993 le trafic a augmenté de 70% sur le réseau des voies rapides d'Ile-de-france, soit une moyenne annuelle de progression de 4,7 %. On a constaté, en particulier une croissance accrue frisant les 6 % l'an, entre 1986 et 1988. On estime qu'actuellement, près de 3 millions de véhicules empruntent quotidiennement ce réseau et que près de 1 100 000 véhicules empruntent le boulevard périphérique de PARIS. Celui-ci fonctionne à plus de 75 % de sa capacité maximale durant plus de 12 heures consécutives par jour (de 7 heures à 19 heures)².

Sur le réseau des autoroutes métropolitaines de Tokyo, le débit journalier a été multiplié par 87 entre 1962 et 1990, passant ainsi de 13 000 véhicules par jour à 1 108 000 en 1990³.

Selon le CALTRANS⁴, les 1900 kilomètres du réseau de voies rapides de la région de Los Angeles et de Ventura supportent quotidiennement un trafic de 146 millions de véhicules.kilomètres, trafic en constante progression de 4 à 5 % par an, alors que le réseau de voies rapides initialement planifié dans les années 1950-1960 n'a été réalisé qu'à un peu moins de la moitié. Aussi pour faire face à l'accroissement de la demande, d'importantes mesures et moyens d'exploitation ont été mis en oeuvre en particulier pour la diffusion d'informations aux usagers et la régulation des accès.

Développement des pôles générateurs de trafic en V.R.U.

Par ailleurs, on assiste depuis plusieurs années au développement des pôles, générateurs de trafic sur les voies rapides urbaines, qui ont une incidence de plus en plus marquée sur le fonctionnement du réseau :

¹ Direction Régionale de l'Équipement d'Ile de France

² Source : Ville de Paris - Direction de la Voirie

³ Source : DREIF/INRETS/DDE94 Rapports de mission sur l'exploitation des voies rapides

⁴ California Department of Transportation / District N° 7 - source Internet 1996

- incidences quotidiennes pour les centres d'affaires, aéroports, gares routières,...
- incidences hebdomadaires pour les centres commerciaux et parcs d'attractions,...
- incidences occasionnelles pour les parcs d'exposition, manifestations sportives, culturelles et politiques...

Un déséquilibre accru entre voies rapides et réseau secondaire

En milieu urbain et périurbain, l'essentiel du trafic s'écoule plutôt par les voies rapides que par les réseaux des voies urbaines et des routes nationales et départementales.

Selon la Ville de Paris², 40 % du trafic parisien est écoulé par le boulevard périphérique pour une surface de chaussée représentant à peine 2,5 % de la voirie totale de la Ville de Paris. Sur le corridor composé des boulevards des Maréchaux : boulevards urbains, et du boulevard périphérique : voie rapide, 82 % du trafic total est assuré par la seule voie rapide contre 18 % aux boulevards urbains.

Cette disparité entre voie rapide et voirie secondaire a tendance encore à se creuser. En effet alors que l'on mesure une progression annuelle du trafic de 4,7 à 6 % sur les voies rapides de la région Ile-de-France, on n'y mesure dans le même temps qu'une progression de 3 % du trafic sur le réseau des routes nationales.

Ce phénomène nécessite une attention particulière de la part des exploitants des voies rapides, en effet, un report de trafic "brutal" de la voie rapide, même limité, vers le réseau secondaire peut entraîner une saturation quasi totale de celui-ci. La mise en oeuvre de la régulation des accès d'une voie rapide, doit faire l'objet d'une attention particulière à ces phénomènes de reports, puisque son action intervient aux frontières des deux domaines.

B. Les perturbations

Les encombrements sur les voies rapides urbaines ont pour causes essentielles :

- soit une trop forte demande de déplacement par rapport à la capacité de l'infrastructure,
- soit les incidents et accidents,
- soit les travaux d'entretien de la voirie.

Les perturbations récurrentes

Des encombrements en forte progression

Malgré le développement de ces réseaux, la demande de déplacement est en augmentation constante, et supérieure à l'accroissement de l'offre. Le résultat est que malgré l'importance des investissements consentis dans les infrastructures, les conditions de circulation tendent à se dégrader au moins durant certaines périodes de la journée, périodes dont la durée tend à s'allonger de plus en plus.

Ainsi, de 1974 à 1986, les encombrements recensés sur les voies rapides d'Ile-de-france (hors boulevard périphérique, A86 et autoroutes à péage) ont augmenté de 600 %, soit une progression annuelle de 16% !

Selon l'étude de M. VERDIER⁵ et si l'on tient compte en plus des congestions sur les 4 tronçons d'A86 (32 km) en service alors en Ile-de-France, les encombrements atteignent en France en 1987, les niveaux suivants,

- boulevard périphérique de Paris : 43 %,
- voies rapides d'Ile-de-france hors péage : 42 %
- autoroutes, routes nationales et départementales autres régions : 10 %
- routes nationales et départementales d'Ile-de-france : 5 %

Il est cependant vraisemblable que ces chiffres doivent être réactualisés, en particulier à cause des congestions récurrentes quotidiennes qui s'étendent ces dernières années sur les réseaux de V.R.U. de nombreuses métropoles régionales.

⁵ Le fonctionnement et l'exploitation du réseau régional de voies rapides d'Ile de France, Pierre Verdier - 1987

Les encombrements : une perte importante pour la collectivité

L'ensemble des encombrements sur la totalité des voies rapides de Paris et de sa région, représentent pour la seule année 1987, selon la DREIF⁶, plus de 70 millions d'heures perdues, soit une perte d'environ trois milliards de Francs pour la collectivité.

Une analyse récente de CALTRANS⁴ estime le coût des congestions sur le réseau de Los Angeles à environ deux milliards de dollars par an.

Tout laisse à penser que cette tendance à la croissance du trafic va se prolonger dans l'avenir. Ainsi une étude de l'administration fédérale américaine prévoit un accroissement des congestions sur les autoroutes américaines de plus de 400 % à l'horizon 2005, en prenant comme base les conditions de trafic de 1989.

Les perturbations non récurrentes

La répartition entre bouchons récurrents et non récurrents varie selon les pays. Par exemple, selon l'étude faite par l'administration fédérale américaine en 1986, 60 % des encombrements avaient pour origine des incidents. L'étude récente de CALTRANS à Los Angeles estime à 50 % le taux de bouchons ayant pour cause des événements "non récurrents". Alors qu'en Ile-de-France, une étude de la DREIF montre qu'en 1983, 40 % des bouchons avaient des causes exceptionnelles.

Parmi les causes exceptionnelles ayant des effets perturbateurs on trouve :

- les travaux d'entretien de la voirie,
- les véhicules en panne,
- les objets divers tombés sur la chaussée,
- les accidents de la circulation.

⁶ SIRIUS : dossier programme, Direction Régionale de l'équipement d'Ile de France - Octobre 1988.

Les accidents : une cause importante de congestion des voies rapides

La congestion provoquée par un incident est dépendante de la durée de l'incident, du nombre de voies neutralisées et du volume de la demande à l'instant de l'incident. Selon une étude américaine, un incident neutralisant une seule voie d'une chaussée qui en comporte 3, entraîne une réduction de capacité de la chaussée de 50 % et de 80 % en cas de neutralisation de 2 voies. Un incident sur la seule bande d'arrêt d'urgence peut provoquer une réduction de capacité de 25 % de ce même type de chaussée sans compter les effets induits sur le trafic de la chaussée dans le sens opposé.

Les causes essentielles des accidents en voies rapides urbaines sont essentiellement liées à des excès de vitesse (la nuit et en heure creuse), à des points singuliers du réseau particulièrement accidentogènes, et enfin aux queues de bouchon.

Les accidents en queue de bouchon représentent 10% des accidents sur les voies rapides d'Ile-de-france selon une étude du SIER en 1993⁷.

Du point de vue de la sécurité routière, le risque d'accident est plus faible sur les voies rapides que sur les autres catégories de voies, cependant les accidents ont des conséquences humaines plus graves, puisque les accidents mortels sont plus nombreux en proportion sur les voies rapides.

Par exemple en Ile-de-France, les statistiques du SETRA montrent que pour les 5 dernières années, 4,5 % des accidents corporels ont lieu sur le réseau de voies rapides alors que celui-ci écoule 20% du trafic global ; mais 10% des accidents mortels ont eu lieu sur ce même réseau.

⁷ Service Interdépartemental d'Exploitation Routière - Etude de Novembre 1993

Les travaux : une autre cause de congestion des voies rapides

L'exécution des travaux sur la voirie, même de faible importance, engendre des difficultés de circulation qui entraînent des risques d'accidents, réduisent la qualité du service attendu par les usagers et constituent aussi une source de bouchons non négligeable.

L'étude de la DREIF, déjà citée, montre que les travaux d'entretien étaient la cause de 8% des bouchons sur les voies rapides d'Ile-de-france, en 1983. Ils sont la cause de 5 % des bouchons à Los Angeles ... et 15 % sur le réseau des voies rapides de Long Island dans l'état de New-York.

L'augmentation de la densité de trafic nécessite désormais une programmation très attentive des chantiers et l'étude précise des flux de trafic et des itinéraires de délestage.

II.3. L'EXPLOITATION : ENJEUX ET DOMAINES

A. Enjeux de l'exploitation des voies rapides urbaines

Optimiser le fonctionnement des réseaux existants

Une des caractéristiques des voies rapides urbaines et périurbaines est qu'elles supportent un trafic qui s'approche ou atteint leur capacité théorique d'écoulement. Elles ne fonctionnent pas de façon optimale : les perturbations y sont fréquentes et prennent rapidement des proportions importantes. Les encombrements sur ces réseaux perturbent considérablement la vie quotidienne des usagers et ont des conséquences particulièrement néfastes sur l'environnement, la consommation d'énergie, la sécurité et l'économie.

Le principal objectif de leur exploitation est donc d'assurer une optimisation permanente de leur condition de fonctionnement.

Sans constituer la "Solution Ultime" aux difficultés de circulation, une exploitation bien organisée peut assurer une meilleure utilisation du réseau existant et maintenir un bon niveau de service, c'est à dire offrir aux usagers des conditions satisfaisantes en terme de vitesse, de temps de trajet, d'interruptions de trafic, de sécurité, de confort et de commodité de conduite.

Il paraît évident que les problèmes de circulation ne pourront être résolus autour des agglomérations que par la mise en oeuvre d'une politique globale impliquant urbanisme et organisation des déplacements, hors des propos de cet ouvrage.

Cependant comme le décrit M. BESNARD⁸, la mission des exploitants de réseaux est désormais "d'utiliser au mieux les réseaux existants pour assurer sur tous les axes, par tous les temps, en toutes situations un écoulement de trafic sûr, régulier sinon fluide, confortable, optimisé". L'activité d'exploitation relève de plus en plus de la gestion des réseaux et des systèmes complexes. Il s'agit de gérer en temps réel un ensemble complexe de facteurs multiples et divers, qui évoluent constamment dans le temps et dans l'espace et interagissent les uns sur les autres.

Dans ce contexte, il est indéniable que les systèmes SAGT et de gestion du trafic sont appelés à jouer un rôle de plus en plus déterminant comme outil permettant d'assurer les missions de l'exploitation.

B. Les domaines de l'exploitation

L'exploitation des V.R.U. : des domaines...

La DSCR a mis en oeuvre le Schéma Directeur d'Exploitation de la Route (SDER) afin d'harmoniser les procédures d'exploitation sur tout le territoire national et de mettre en oeuvre un niveau de service d'exploitation adapté aux perturbations rencontrées sur

⁸ S. BESNARD : Les équipements d'exploitation de la route : conception et maintenance. Revue Travaux N°616 - Décembre 1986.

chaque type de réseau routier. Le SDER définit et organise les domaines de l'exploitation de la route selon la décomposition suivante :

- le maintien de la viabilité, c'est l'ensemble des interventions sur le terrain qui permettent, en cas de perturbation, de maintenir ou de rétablir les conditions d'utilisation les plus proches de la situation normale définie pour une voie ;
- la gestion du trafic, c'est l'ensemble des dispositions destinées à répartir les flux de circulation dans le temps et dans l'espace, afin d'éviter l'apparition des perturbations ou tout au moins de les atténuer ;
- l'aide au déplacement, c'est l'ensemble des dispositions destinées à améliorer le confort de l'utilisateur de la route, notamment par la diffusion d'informations prévisionnelles ou factuelles sur les conditions de circulation, mais aussi par l'organisation de services tel qu'assistance et dépannage.

..... des objectifs et des missions

Les objectifs de l'exploitation, couvrant chacun de ces domaines, sont essentiellement définis en fonction des contraintes locales. Les objectifs les plus fréquemment cités sont les suivants :

- l'amélioration de la sécurité,
 - par la détection rapide des incidents et des bouchons, et l'information aux usagers circulant sur la voie rapide en amont d'un incident (cas du système SIRIUS en région parisienne, du système CORALY en région lyonnaise, du système MARIUS en région marseillaise, et du système gérant le boulevard périphérique de Paris)
 - par la réduction automatique des vitesses (cas de MARIUS),...

- l'amélioration de la circulation durant les pointes journalières,
par l'information aux usagers (utilisation optimale du maillage du réseau et diffusion d'une information comparative en amont des points de choix : cas de SIRIUS),...
par le basculement d'itinéraire par le jalonnement variable (cas de CORALY à LYON),
- l'amélioration du confort de l'usager,
par la diffusion des temps de parcours instantanés aux usagers (Région parisienne),
- la limitation sur l'ensemble du réseau des répercussions dues aux accidents et aux chantiers,
par une détection plus rapide des incidents, une meilleure gestion des moyens d'intervention, une gestion prévisionnelle centralisée des chantiers,... (cas de SIRIUS, MARIUS, CORALY)
- la réduction des temps de parcours,
par l'information des usagers, (cas de SIRIUS et CORALY)
par la régulation des accès, (cas de SIRIUS et CORALY)

La mise en place des politiques d'exploitation s'appuie sur des outils et des systèmes d'aide à la gestion du trafic assurant un certain nombre de fonctions plus ou moins automatisées. Il existe désormais de nombreux systèmes automatiques dans le monde pour assurer les missions d'exploitation, ils possèdent tous un certain nombre de dénominateurs communs.

II.4. LES MISSIONS POUR L'EXPLOITATION DES V.R.U.

A. La connaissance du trafic

Superviser le trafic : une mission de base de l'exploitant

La fonctionnalité de base d'un système d'aide à la gestion du trafic concerne la connaissance instantanée de l'état du trafic en tout point du réseau géré. Cette connaissance est assurée par différents dispositifs de recueil de données sur le terrain : capteurs électromagnétiques (les plus utilisés), radars, caméras, détecteurs à ultrasons (au Japon),... dont les données de base servent à élaborer une information décrivant l'état du trafic (trafic fluide, dense, saturé,...) sur l'ensemble de la voie rapide. Cette information est la plus fréquemment affichée sur des synoptiques animés présentant la cartographie du réseau de voies rapides. Par exemple sur le réseau de Los Angeles la connaissance du trafic est assurée par l'intermédiaire de 6380 capteurs électromagnétiques installés tous les 800 mètres sur les voies rapides, sur les accès et sur les sorties. A terme, il est prévu l'installation de 23 000 boucles pour superviser totalement le réseau.

Par ailleurs, des caméras de vidéosurveillance sont utilisées comme autre moyen de supervision de certaines zones du réseau, en complément du recueil automatique.

Des algorithmes au service de la supervision

Des outils supplémentaires d'analyse complètent les outils de connaissance du trafic :

- il peut s'agir d'outils graphiques présentant l'évolution instantanée et croisée de certains indicateurs sur des courbes ou histogrammes, mettant en évidence ainsi des phénomènes de trafic particulier,
- il peut s'agir d'algorithmes qui, exécutés sur les données recueillies, permettent d'assister l'exploitant sur la détection d'événements particuliers : par exemple, les algorithmes de détection automatique de bouchons (DAB) et de détection automatique d'incidents (DAI).

Par exemple, le système SIRIUS de gestion des voies rapides d'Ile-de-france intègre une fonction de détection automatique des bouchons, qui, une fois détectés, sont soumis à

l'exploitant pour confirmation. Ces bouchons sont alors suivis automatiquement par le système qui surveille en permanence leur localisation et leur longueur afin d'informer automatiquement les usagers.

B. L'information des usagers

L'information : un outil pour améliorer la sécurité et un moyen de régulation

L'information des usagers prend une part de plus en plus prépondérante dans la plupart des systèmes de gestion de trafic. En effet, l'information directe transmise aux usagers permet de remplir plusieurs objectifs d'exploitation : l'amélioration de la sécurité, l'amélioration du confort de l'utilisateur, la régulation, le guidage, etc....

L'information aux usagers utilise en général plusieurs canaux :

- les panneaux à messages variables répartis le long du réseau et plutôt utilisés à des fins de régulation et de sécurité,
- les médias d'information : essentiellement la radio pour l'information routière.

A noter que des nouveaux médias commencent à être utilisés :

- en France, on peut consulter la carte de l'état du trafic instantané en Ile-de-France via le réseau INTERNET* et des bornes de consultation de l'état du trafic vont être progressivement installées dans les lieux publics,
- en Californie, une carte de l'état du trafic de la région de Los Angeles est diffusée en temps réel sur la chaîne CHANNEL 35 à destination de 500 000 foyers câblés et affichée 24 heures sur 24 dans une douzaine de kiosques dans l'agglomération ;

* Service proposé par la DREIF : www.club-internet.fr/sytadin/map.html

- en France, des serveurs vocaux interrogeables par téléphone permettent la diffusion d'informations de trafic ciblées (réseau SFR, serveur AlloTrafic à Toulouse, serveur InfoParcours à reconnaissance vocale en Ile-de-France, 3615 Route, Audiotel, etc) ;
- enfin la diffusion d'informations routières ciblées, via des terminaux embarqués dans les véhicules, a été expérimentée dans plusieurs pays (CARMINAT et IN-FLUX en France).

Les panneaux à messages variables sont diversement utilisés selon les systèmes ; ils permettent de diffuser :

- des messages textuels informant sur les accidents et les bouchons,
- des messages de guidage et de sortie conseillée,
- des informations de trafic permettant de faire des choix, (temps de parcours)
- des signaux variables : attention, travaux, limites conseillées de vitesse,...
- des graphiques animés de la portion courante du réseau (à Tokyo)...

C. La détection et le traitement des incidents

La gestion des incidents est une fonctionnalité de la plupart des systèmes d'aide à la gestion du trafic des voies rapides urbaines des grandes agglomérations du monde industrialisé. En sachant que les incidents provoquent, selon les pays de 40 à 60 % des congestions en voies rapides, la réduction des délais de détection, et des délais d'intervention est un facteur prépondérant pour la réduction de la gravité des accidents corporels et le rétablissement d'un niveau de viabilité suffisant avec un impact minimisé sur le trafic (sans compter qu'à l'évidence, la réduction des délais d'intervention en cas d'accidents corporels permet de sauver des vies humaines).

La gestion des incidents couvre des missions de l'exploitation et l'organisation de l'exploitation en conditionne directement son efficacité.

Une détection rapide et efficace des incidents

Le caractère imprévisible de l'incident rend nécessaire l'utilisation de l'ensemble des moyens humains et matériels organisés pour une détection et un diagnostic rapide et complet. Ces moyens sont dans la plupart des cas :

- les usagers via le réseau d'appel d'urgence,
- les patrouilles de police,
- les équipes d'exploitation et de maintenance,
- les caméras de télésurveillance, manuelles ou couplées à un dispositif de traitement d'images pour la détection automatique des arrêts,
- la fonction de supervision automatique du trafic couplé à un algorithme de détection automatique d'incident,
- des moyens aériens (dans certains cas),
- la CB (Citizen's Band dans certains cas),
- les autres usagers de la voie rapide urbaine via le téléphone mobile.

La CB est largement utilisée aux Etats-Unis, moins comme outil de détection que comme moyen de validation de l'existence et de la nature de l'incident.

A Chicago, on encourage les conducteurs ayant des téléphones portables à signaler les incidents par l'intermédiaire d'un numéro spécialisé. Ce service a été introduit en 1989 et reçoit, en moyenne 7000 appels par an. Cela nécessite néanmoins la mise en place de points de repères géographiques le long de la voirie, suffisamment nombreux et facilement identifiables.

Il existe de nombreux algorithmes de DAI basés sur des capteurs boucles électromagnétiques, utilisés en particulier aux Etats-Unis, au Canada, en Angleterre et en région parisienne.

A l'analyse, il semble qu'ils soient peu utilisés : un rapport de Kevin N. Balke⁹ constate que les seuls algorithmes vraiment utilisés en Amérique du Nord sont dérivés de l'algorithme californien (à l'exception de TORONTO qui utilise l'algorithme McMaster). Ce rapport constate par ailleurs que les opérateurs ne s'appuient pas vraiment sur les algorithmes de la DAI pour la détection des incidents, la plupart du temps, ils connaissent l'apparition des incidents par d'autres moyens. En France, des algorithmes de DAI à base de boucles sont présents dans le système de supervision du boulevard périphérique de Paris et dans le système SIRIUS, ils ne sont pas utilisés en pratique du fait de leur difficulté de calibrage.

L'ensemble des équipements installés le long de la voirie permet une réduction significative des délais d'intervention. Une étude du SIER¹⁰ en 1994 montre que le système SIRIUS avec ses équipements (caméras, postes d'appel d'urgence, recueil automatique de données) permet une réduction des délais d'intervention sur incident de l'ordre de 10 minutes.

Des interventions et des mesures d'exploitation coordonnées

Outre la détection rapide et efficace de l'incident, la gestion de l'incident comprend un certain nombre d'actions d'exploitation qui nécessitent efficacité et rapidité et en particulier une bonne coordination de tous les acteurs, on peut citer :

- la qualification de l'incident qui doit permettre de faire intervenir rapidement les moyens appropriés,
- la coordination des équipes d'interventions,
- la mise en place des mesures d'exploitation et des itinéraires de délestage (le cas échéant),
- l'information des usagers,
- le rétablissement de la viabilité...

⁹ KEVIN N BALKE : An évaluation of existing incident algorithms - Novembre 1993

¹⁰ SIRIUS dossier de presse pour la conférence du 10 Janvier 1994

D. La régulation du trafic

La régulation des vitesses : agir sur l'écoulement

La régulation des vitesses est un moyen de réguler le trafic des voies rapides par l'affichage à intervalles réguliers d'un conseil de vitesse variable selon les conditions de trafic et selon l'environnement. Ses effets sur le trafic portent essentiellement sur un accroissement de la capacité de la section de voirie par la mise en place d'un écoulement plus fluide du trafic. On peut citer également des gains significatifs en matière de sécurité, mesurés sur la plupart des sites. Ce dispositif est opérationnel depuis une vingtaine d'année sur l'autoroute Nord de Marseille et sur quelques sites européens (Pays-Bas, Allemagne, Royaume-Uni).

La régulation des accès : agir sur la demande

La régulation des accès est un moyen actif de régulation du trafic sur les voies rapides urbaines agissant directement sur la demande. Il existe différentes méthodes et stratégies pour réguler les accès : la restriction physique de la capacité des accès, la fermeture provisoire, la régulation locale par feux, la régulation coordonnée...

La régulation des accès aux voies rapides est une fonctionnalité présente et très utilisée dans la plupart des systèmes autoroutiers de gestion de trafic américains. Elle est également présente en Angleterre, aux Pays-Bas, en France (région parisienne et région lyonnaise), mais assez peu en Allemagne et très peu au Japon (vraisemblablement du fait de la présence de péages sur les voies rapides urbaines qui régulent, de fait, les entrées et dans certains cas la fermeture de certains accès pendant une demi-heure).

La bibliographie américaine sur le sujet fait état de gains très importants en matière de sécurité, certains chiffres font état d'une réduction du nombre d'accidents de l'ordre de 25 à 50 % (AIPCR)¹¹. Sans doute, ces chiffres seraient liés à des habitudes particulières de

¹¹ AIPCR : Exploitation et gestion - Question III- XIXième congrès Mondial de la route, MARRAKECH, Sept 1991.

conduite (conduite très calme, peu d'excès de vitesse) qui ferait qu'un grand nombre d'accidents sur voie rapides seraient localisés aux accès.

En Europe, de nombreuses expériences, menées notamment en France par l'INRETS, ont montré que la régulation des accès avait un impact bénéfique sur les temps de parcours et sur le débit écoulé.

Les chapitres suivants sont consacrés exclusivement à la présentation des méthodes, des techniques et des équipements nécessaires au fonctionnement de la régulation d'accès.

E. D'autres missions et d'autres outils...

Les systèmes d'aide à la gestion du trafic disposent d'autres fonctionnalités qui varient en fonction des missions d'exploitation particulières et des objectifs assignés à ces systèmes.

Le jalonnement variable : un outil original très développé en Allemagne

Parmi ces fonctionnalités on peut citer la régulation d'itinéraire en vigueur notamment en région lyonnaise et en Allemagne.

La région lyonnaise se situe sur un axe de transit majeur, national et international et son réseau de voies rapides doit faire face à des conditions de trafic très variées : heures de pointes quotidiennes, grandes migrations saisonnières et week-end exceptionnels. Aussi le système CORALY assure le traitement volontaire du trafic de transit, par le changement de mention sur des panneaux de signalisation directionnelle variable (SDV) orientant le trafic sur une maille ou sur une autre.

En Allemagne, les systèmes mettent en oeuvre des signaux de direction dynamiques qui, pour une destination donnée, orientent le trafic sur différentes mailles du réseau selon l'état du trafic. Cette fonction, mise en place pour la première fois en 1974 sur le réseau d'autoroutes aux environs de Francfort, se généralise depuis. Aujourd'hui on compte 6 zones équipées de panneaux de directions dynamiques principalement en Bavière (Munich et Nuremberg), dans la Ruhr (Wuppertal) et en Rhénanie (Francfort, Coblenze, Cologne).

D'autres outils variés

Parmi les autres fonctions, on peut citer :

- la détection de conditions météorologiques particulières (pluie, brouillard, verglas...),
- la gestion des tunnels : détection d'incendie, de gaz toxiques,
- la diffusion automatique d'informations de trafic vers d'autres systèmes d'information ou médias,...

Les fonctions d'études : des outils de plus en plus indispensables

On peut noter la place de plus en plus grande que sont appelées à prendre les fonctions d'études dans les systèmes de gestion de trafic, fonctions s'appuyant sur la recherche en matière de modélisation du trafic. Parmi ces fonctions on peut retenir :

- les fonctions d'analyse du trafic (a posteriori),
qui à partir des données de trafic recueillies permettent de qualifier le réseau, c'est à dire d'identifier ses paramètres de fonctionnement (capacité, vitesse libre, vitesse à capacité...) et ainsi de localiser les points particuliers nécessitant des aménagements,
- les fonctions de simulation,
qui à partir de modèles d'écoulement et d'affectation du trafic permettent d'évaluer des stratégies de régulation et d'information, de détecter les données incohérentes du recueil automatique, et de reconstituer les données manquantes (absence de recueil, panne de capteur,...)
- les fonctions de prévision à court terme,
qui permettent de prévoir les répercussions sur le trafic d'un incident dans 15 minutes, 1 heure,...et d'en déduire les actions d'exploitation les plus adaptées,
- les fonctions de prévision à moyen terme, (1 à 2 jours) qui permettent de prendre en compte des événements extérieurs (grèves dans les transports en commun, manifestations diverses,...) pour en

déduire la localisation et l'importance des points noirs et anticiper les actions d'exploitation.

III. LA REGULATION DES ACCES : PRESENTATION GENERALE

III.1. LA CARTE DE SON UTILISATION

A. Aux Etats-Unis

Une utilisation généralisée

Depuis le début des années 60, des systèmes de régulation d'accès aux autoroutes ont été installés aux Etats-Unis et se sont généralisés depuis lors.

Les premières expérimentations ont eu lieu à Detroit. Dès 1963, les premières mises en service opérationnelles apparaissent à Chicago. A Los Angeles, la régulation des accès aux autoroutes commence en 1968 et depuis le système n'a cessé d'être étendu pour finalement couvrir plus de 900 accès, ce qui en fait le plus grand système mondial.

Aujourd'hui, aux Etats-Unis, la régulation des accès constitue la technique de régulation du trafic des autoroutes la plus employée. Cet outil est présent dans la plupart des systèmes d'exploitation de réseau autoroutier des grandes villes américaines. Différentes techniques de régulation d'accès sont utilisées, allant des stratégies à feux de cycle fixe, aux stratégies adaptatives.

Le tableau suivant présente des exemples de mise en oeuvre opérationnelle particulièrement significatifs :

<u>Agglomération</u>	<u>Taille du réseau</u>	<u>Nombre d'accès régulés</u>	<u>Source</u>
Boston		20	1991
Chicago	218 km	109	1994
Détroit	685 km	49	1991
Los Angeles	1172 km	900	1994
Minneapolis	528 km	354	1991
New York / Long Island	230 km	74	1994

San Diego		78	1991
San Francisco		45	1991
Texas	260 km	207	1994
Washington	56 km	23	1993

A Minneapolis

Le cas de Minneapolis est particulièrement intéressant. Le Département Transport de l'état du Minnesota a introduit le système de gestion des autoroutes de l'agglomération des «Villes Jumelles» de Minneapolis et St-Paul, progressivement sur une période de plus de 20 ans.

En 1970, les deux premiers accès régulés sont installés sur une section de 8 km de l'autoroute I-35E au nord du centre ville de St-Paul. Cette régulation d'accès par feux à cycle fixe, fonctionnant au goutte-à-goutte (un véhicule à la fois), permet déjà une augmentation de 22% de la vitesse moyenne sur cet axe. En novembre 1971, le dispositif initial est amélioré pour devenir adaptatif et 4 accès supplémentaires sont régulés. Cette section de l'autoroute I-35E est régulièrement analysée depuis lors, et en 1985, on a montré que les vitesses moyennes observées sont 16% plus élevées qu'avant la régulation des accès, alors que dans le même temps, les débits ont augmenté de 25%. Du point de vue de la sécurité, les gains sont également significatifs puisque le taux d'accident en heure de pointe a chuté de 38%.

En 1974, un projet d'exploitation de l'autoroute I-35W est lancé et prévoit, entre autres, de gérer 39 accès. Dix ans après, des études d'évaluation concluent que les vitesses moyennes sur l'axe régulé ont augmenté de 35%, et que le taux d'accident a été réduit de 38%.

Aujourd'hui le système intégré de gestion des autoroutes de Minneapolis/St-Paul comporte 354 accès régulés pour un linéaire de 528 km de réseau. Le goutte-à-goutte est utilisé, et généralement, une voie de l'accès est réservée au covoiturage. La régulation d'accès paraît particulièrement performante : elle repose en grande partie sur des techniques automatiques et s'appuie sur un réseau de boucles particulièrement dense.

A Los Angeles

A Los Angeles, les cycles de feux sont fixes un tiers du temps et adaptatif le reste du temps. «L'adaptativité »est opérée localement au niveau de l'accès : la coordination entre accès n'est pas largement pratiquée.

La stratégie de régulation d'accès vise essentiellement à améliorer l'insertion des véhicules aux accès et ne cherche pas à inciter les usagers à utiliser le réseau de surface. La marge de manoeuvre de la régulation d'accès est ainsi réduite car le remplissage de la bretelle provoque immédiatement la mise en place d'un cycle à débit maximum.

Cependant des effets significatifs sont mesurés : ils concernent essentiellement une meilleure répartition des densités de trafic le long des voies, et une diminution des congestions en heure de pointe.

D'une manière générale, on constate qu'aux Etats-Unis, la plupart des dispositifs de régulation d'accès installés d'abord à une petite échelle ont été progressivement étendus. Ceci constitue en soi, un premier indicateur d'efficacité.

B. Au Japon

Des fermetures totales périodiques

La généralisation des péages aux accès des réseaux de voies rapides japonaises fait qu'il n'existe quasiment aucun dispositif de régulation par feux aux accès (un seul accès est régulé par feux sur le réseau de Tokyo sur l'autoroute Narita).

Cependant des fermetures totales des accès sont régulièrement pratiquées pour des durées d'une demi-heure à des moments fixés dans la journée et portés à la connaissance des usagers par l'intermédiaire des radios et des panneaux à message variable.

C. En Europe

Côté européen, à l'exception de quelques expériences significatives, la régulation des accès n'a pas connu le même développement qu'en Amérique du Nord.

En Grande-Bretagne

On peut néanmoins mentionner la Grande-Bretagne avec la régulation par feux d'un accès de l'autoroute M6 en 1986, étendu progressivement à 6 accès en 1989, régulation effectuée par une stratégie adaptative.

Aux Pays-Bas : un développement récent

Aux Pays-Bas, la régulation a été utilisée sur un accès équipé de feux tricolores sur l'autoroute A10 WEST près d'Amsterdam en 1989, puis étendue à 4 accès en 1994. La particularité de ce site est que les bretelles d'accès sont équipées de dispositifs assurant un écoulement du trafic véhicule par véhicule.

L'expérience menée à Amsterdam à partir 1994 dans le cadre du projet EUROCOR¹³ de DRIVE 2, a permis de comparer de manière précise les effets de plusieurs stratégies adaptatives locales et coordonnées par rapport à une situation de référence sans régulation. Le résultat le plus significatif est que le temps de parcours moyen sur des itinéraires associant autoroute et rampes d'accès a été réduit de 19 % en fonctionnement régulé avec la stratégie ALINEA.

Depuis, la régulation des accès a été étendue à l'autoroute A12 (à proximité de ZOETERMEER) et d'autres expériences sont menées dans le cadre du projet européen DACCORD de DRIVE 3. Les premières indications ont été communiquées en Avril 96 : elles laissent entendre que la stratégie adaptative FUZZY, basée sur des méthodes de logique floue, donnerait des résultats remarquables.

¹³ F. MIDDELHAM, H. TAALE (RWS-AVV), B.V VELZEN : An assessment of multiple ramp metering on the Amsterdam ring-road : Project V 2017 W.P. 6.2 Deliverable 11A - Mars 1995

D. En France

Des expériences significatives

En France, l'INRETS a mené de nombreuses expérimentations sur le boulevard périphérique de Paris en 1981, 1985, 1988 et 1993. Elles ont eu pour objectif de comparer plusieurs méthodes de régulation, soit par l'aménagement physique des accès, soit par l'utilisation de feux animés par des stratégies à cycles de feux fixes, soit par l'utilisation de feux animés par des stratégies adaptatives. Ces travaux ont permis de mettre au point une des stratégies adaptatives les plus performantes : la stratégie ALINEA présentée dans le chapitre 4.

La plus grosse opération de régulation en Europe

D'autre part, il faut citer le dispositif installé dès la fin des années 70 sur les autoroutes de la région Ile-de-France dans le cadre d'une opération visant à améliorer les conditions de trafic, dénommée «Les matins d'Ile-de-france». Ce système, basé sur une régulation par feux à cycle fixe, fonctionnant durant les heures de pointe du matin et du dimanche soir, constitue toujours l'une des plus importantes opérations de régulation d'accès en Europe, avec une quarantaine d'accès gérés sur les autoroutes A1, A3 et A6.

Dans la région lyonnaise des dispositifs de régulation par barrières automatiques ont été installés il y a une dizaine d'années sur 6 accès de l'axe A6-A7 et intégrés récemment dans le système CORALY de gestion du trafic, afin de fluidifier le trafic aux abords du célèbre tunnel de Fourvière.

III.2. LES OBJECTIFS DE LA REGULATION DES ACCES

La relation entre la demande et la capacité

Issu de l'expérience, le diagramme fondamental d'une portion de voie, présenté sur le schéma suivant, traduit la relation qui existe entre le débit et le taux d'occupation. Le débit représente le nombre de véhicules franchissant un point par unité de temps, le taux

d'occupation permet de représenter la densité de véhicules en ce point et traduit la demande instantanée.

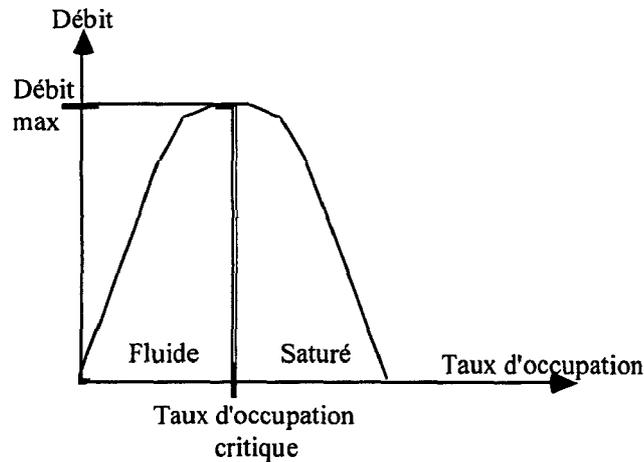


Fig. III.1. : Allure du diagramme fondamental

Le diagramme fondamental est lié au profil de la section de chaussée mais il peut varier pour cette section selon les conditions météo : par exemple, la capacité d'écoulement de trafic d'une section d'autoroute est réduite de 20 % par temps de pluie.

Le diagramme fondamental montre que le débit croît d'une manière quasiment linéaire avec le taux d'occupation jusqu'à un point critique à partir duquel il diminue, alors que le taux augmente toujours. Ceci signifie qu'au-delà de ce point de fonctionnement, le nombre de véhicules écoulés par la chaussée diminue alors que la demande s'accroît : c'est le bouchon !

Selon M. DE BALINCOURT¹⁴, à la limite de saturation, un excès de demande de l'ordre de 3 à 5% pendant une heure, induit une chute de capacité de 10 à 20 % et un accroissement des temps de parcours de 100 à 200 %.

Adapter la demande sur la V.R.U.

Aussi, le premier objectif de la régulation d'accès est d'éviter ou de retarder les congestions en agissant directement sur la demande : il consiste à adapter le nombre de

¹⁴ DE BALINCOURT Exploitation du réseau de V.R.U. d'Ile-de-France. Mémoire de DEA. ENPC - 1989

véhicules entrants sur l'autoroute de manière à ce que la demande reste inférieure à la capacité d'écoulement de l'autoroute. Pour cela, on utilise les rampes d'accès comme des zones de stockage temporaire.

Améliorer la sécurité

D'autre part, la régulation d'accès, exerçant un contrôle du flot des véhicules entrants, permet de réduire les conflits d'insertion, générateurs de brusques variations de vitesse et quelquefois d'accidents.

Optimiser certains paramètres du trafic de la V.R.U.

Selon M. S. COHEN¹⁵, en mettant en place une régulation des accès, on peut chercher :

- à maximiser les débits de sortie d'une zone déterminée de l'autoroute,
- à minimiser les temps de parcours moyens sur une zone déterminée de l'autoroute,
- maximiser les débits entrants sous contrainte de fluidité,
- maximiser le taux d'utilisation global de l'autoroute,...

Les deux premiers points cités sont liés à l'optimisation de la vitesse moyenne de la voie rapide, alors que les deux derniers points sont liés à l'optimisation du débit.

Favoriser certains trajets

D'autre part, il peut être envisagé la mise en place de dispositifs de régulation sur certains accès d'une voie rapide pour favoriser certains usages :

- favoriser le trafic de transit par rapport au trafic local notamment en cas de plan d'urgence (plan PALOMAR),
- favoriser les trajets longs par rapport aux trajets courts,

¹⁵ S. COHEN : Ingénierie du trafic routier. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - 1990

- favoriser les usagers ayant acquitté un péage, (dans le cas des autoroutes à péage devenant gratuites aux abords des agglomérations)...

Un objectif local ou régional

Une régulation d'accès peut être appliquée :

- localement sur une portion de voie rapide (*régulation localisée*),
- globalement sur un axe (*régulation d'axe*).

La *régulation localisée* consiste à mettre en place des dispositifs visant à améliorer le fonctionnement local de l'autoroute au voisinage d'un accès ou d'un point critique. Celui-ci peut être une zone à réduction de capacité (réduction du nombre de voies, virage, côte...), un ouvrage dont les consignes de sécurité imposent un niveau de fluidité minimal (tunnel, pont, viaduc...) ou un chantier de longue durée.

Un certain nombre d'expériences européennes ont cette vocation :

- c'est le cas en Grande-Bretagne où la régulation a été mise en place sur 6 accès de l'autoroute pour maintenir la fluidité aux abords des points critiques ;
- c'est également le cas à Amsterdam où la régulation d'accès a été installée sur 4 accès à l'amont du Coentunnel (tunnel sous un bras de mer) afin de maintenir une certaine fluidité dans le tunnel.

La *régulation d'axe* vise à améliorer globalement le niveau de service d'une autoroute. Elle est optimale lorsque la voie rapide ne présente pas de point terminal, source d'une congestion sur laquelle on ne dispose pas de moyen d'actions comme les autoroutes radiales vers les grandes agglomérations et dont le trafic est difficilement absorbé par le réseau urbain. Par contre sur ces mêmes autoroutes dans le sens sortant, la *régulation d'axe* paraît plus optimale du fait de la dispersion du trafic.

Sur les rocade, la *régulation d'axe* est particulièrement efficace lorsque la plupart des accès sont régulés : hormis les situations d'incidents et d'accidents, tous les phénomènes

de congestion peuvent être contrôlés avec un temps de réaction et une efficacité qui dépendent de la stratégie adoptée.

On peut noter qu'un péage autoroutier a un effet régulateur sur le trafic d'une voie rapide : il peut être inutile de mettre en place des dispositifs de régulation sur les accès situés juste en amont ou à proximité d'un péage : il est vraisemblable dans ce cas que l'impact du péage sur le trafic soit plus important que celui des accès régulés. Ce dispositif est utilisé au péage de St Hélène sur le réseau AREA.

III.3. UN EXEMPLE DE CALCUL DE GAIN

Ce paragraphe a pour objectif de démontrer les gains théoriques calculés, apportés par la régulation d'un accès. Ces calculs sont effectués sur les indicateurs suivants :

- le temps au bout duquel la file d'attente disparaît,
- le retard total,
- le retard individuel.

On considère un accès isolé sur une portion de voie rapide urbaine avec, en l'absence de toute régulation, les diagrammes de demande et d'offre suivants ainsi que les capacités sur chaque tronçon :

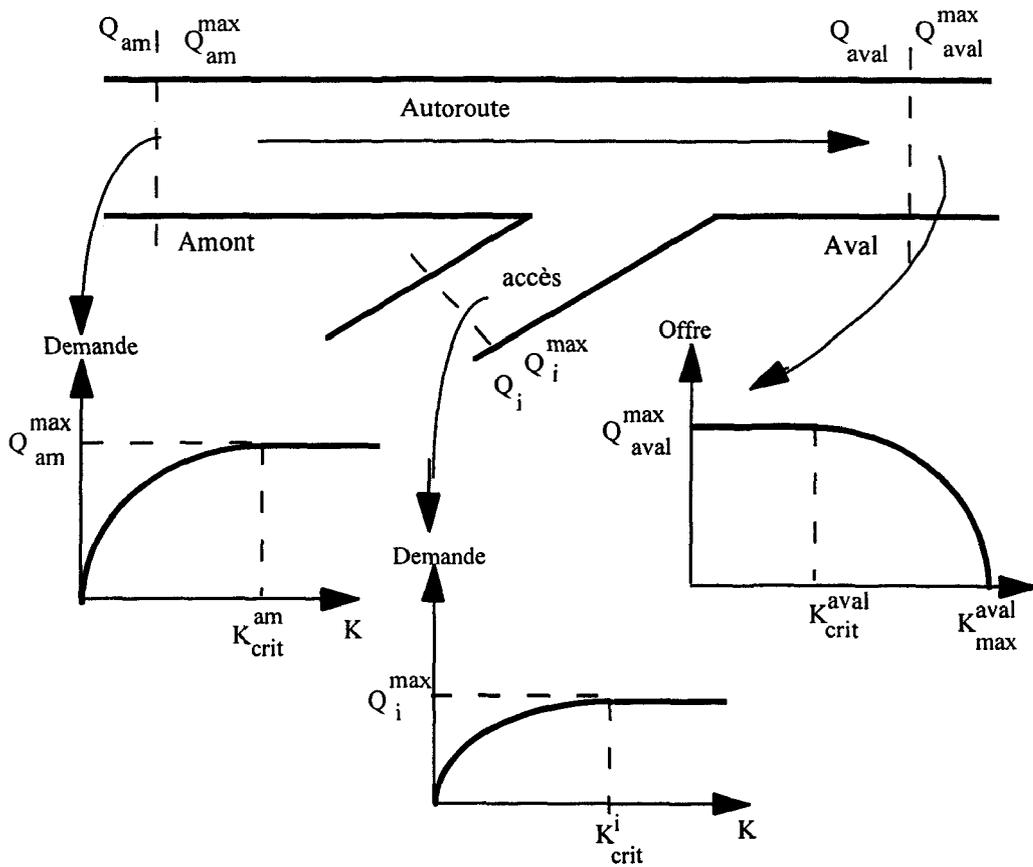


Fig. III.2. : Demande et offre sur l'accès considéré.

Notations : K représente la concentration, N le nombre de véhicules dans la file d'attente, t_q le temps de fin de congestion.

La pertinence de la régulation d'accès sur la bretelle doit évidemment s'apprécier par comparaison de la demande avec l'offre comme indiqué ci-dessus.

	$Q_{am} < Q_{am}^{max}$	$Q_{am} > Q_{am}^{max}$
$Q_{am} + Q_i < Q_{aval}^{max}$	Situation fluide en amont et en aval	SANS OBJET
$Q_{am} + Q_i > Q_{aval}^{max}$	Domaine d'application de la régulation d'accès	REGULATION INOPERANTE

Dans la situation ($Q_{am} < Q_{am}^{max}$, $Q_{am} + Q_i > Q_{aval}^{max}$), c'est à dire la situation où la demande globale est supérieure à l'offre sans que l'amont soit saturé, la stratégie de régulation d'accès consiste à réduire le débit de rampe avec une valeur $Q_i^r < Q_i$, de manière à se situer dans l'état limite de fluidité en aval : $Q_{am} + Q_i^r = Q_{aval}^{max}$.

Supposons, par souci de simplification de l'exposé que la demande, c'est à dire la somme $Q_i + Q_{am}$, évolue au cours du temps de la façon suivante :

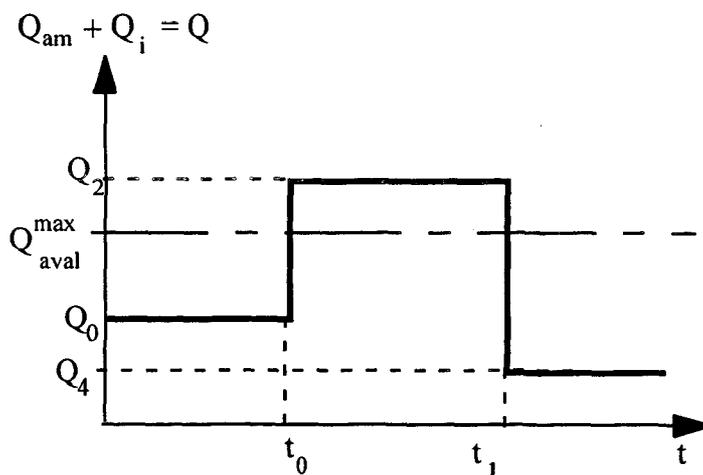


Fig. III.3. : évolution de la demande dans le temps

En l'absence de régulation, l'excès de la demande sur l'offre en aval induit une situation de congestion caractérisée par une augmentation du taux d'occupation et une diminution des vitesses, donc une baisse du débit écoulé en section courante. L'offre maximale entre t_0 et t_1 sera de l'ordre $Q_{aval}^{cong} < Q_{aval}^{max}$.

Le développement des calculs est fourni pour le lecteur intéressé au chapitre VIII.

Première situation : pas de régulation de l'accès

Le diagramme suivant présente le débit écoulé dans le temps en tenant compte de la situation de saturation. Ce diagramme fait apparaître le retard $d(t)$ individuel induit par la congestion et le retard global D .

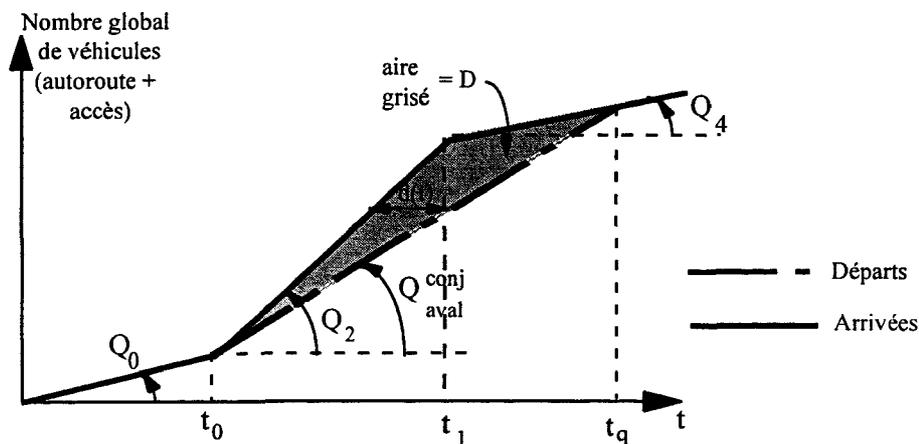


Fig. III.4. : Evolution du débit écoulé sans régulation

Deuxième situation : avec régulation de l'accès

Les contraintes à vérifier sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{am} + Q_i^r \leq Q_{aval}^{max} \\ Q_i^r \leq Q_i^{cong} \end{array} \right.$$

Dans cette situation le trafic est congestionné uniquement sur la bretelle donc la capacité possible est Q_i^{cong} . Les domaines de validité se caractérisent par le schéma suivant :

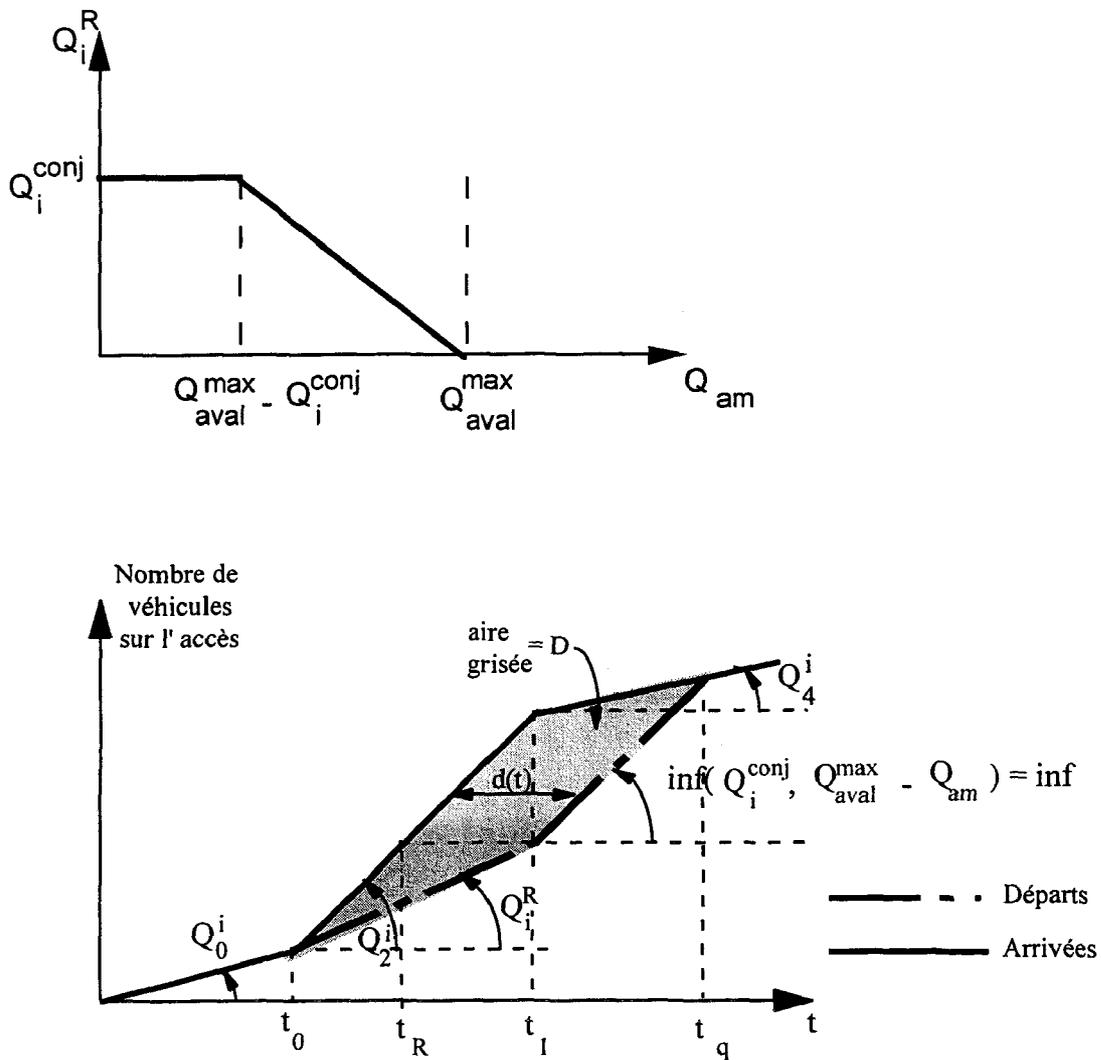


Fig. III.5. : Evolution du débit écoulé avec régulation

Par souci d'homogénéité avec les notations précédentes, nous avons ajouté un exposant i sur les variables ad hoc.

Application numérique :

Données		Sans régulation d'accès	Avec régulation d'accès
$t_0 = 0$ $t_1 - t_0 = 2h$ $Q_{\text{aval}}^{\text{max}} = 3600 \text{ veh/h}$ $Q_{\text{aval}}^{\text{cong}} = 2800 \text{ veh/h}$ $Q_i^{\text{cong}} = 1400 \text{ veh/h}$	$Q_i = 3800 \text{ veh/h}$ avec $Q_{\text{am}} = 3000 \text{ veh/h}$ $Q_i = 800 \text{ veh/h}$	$t_q = 4,5 \text{ h}$ $D = 4500 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 43 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 2000 \text{ veh}$	$t_q = 2,35 \text{ h}$ $D = 470 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 30 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 400 \text{ veh}$
$Q_{\text{aval}}^{\text{cong}} = 3000 \text{ veh/h}$ $Q_i^{\text{cong}} = 1500 \text{ veh/h}$	$Q_i = 3800 \text{ veh/h}$ avec $Q_{\text{am}} = 2800 \text{ veh/h}$ $Q_i = 1000 \text{ veh/h}$	$t_q = 3,6 \text{ h}$ $D = 2880 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 32 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 1600 \text{ veh}$	$t_q = 2,32 \text{ h}$ $D = 464 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 24 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 400 \text{ veh}$
$Q_{\text{aval}}^{\text{cong}} = 3400 \text{ veh/h}$ $Q_i^{\text{cong}} = 1700 \text{ veh/h}$	$Q_i = 3800 \text{ veh/h}$ avec $Q_{\text{am}} = 3000 \text{ veh/h}$ $Q_i = 800 \text{ veh/h}$	$t_q = 2,57 \text{ h}$ $D = 1028 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 14 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 800 \text{ veh}$	$t_q = 2,27 \text{ h}$ $D = 455 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 30 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 400 \text{ veh}$
	$Q_i = 3650 \text{ veh/h}$ avec $Q_{\text{am}} = 2450 \text{ veh/h}$ $Q_i = 1200 \text{ veh/h}$	$t_q = 2,36 \text{ h}$ $D = 589 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 9 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 500 \text{ veh}$	$t_q = 2,07 \text{ h}$ $D = 103 \text{ veh/h}$ $d_{\text{max}} = 5 \text{ min}$ $N_{\text{max}} = 100 \text{ veh}$

Conclusion : le temps perdu global D a au maximum été divisé par 10 et le temps perdu individuel maximum est souvent plus faible avec régulation que sans régulation.

Nota : les calculs ont été effectués à demande et offre constante sur un intervalle de temps. La même démarche pourrait être conduite avec des états de trafic aléatoires.

III.4. LES METHODES POUR REGULER UN ACCES

Un choix de méthode à faire au cas par cas

Il existe plusieurs méthodes visant à restreindre le flot des véhicules entrants sur une voie rapide :

- la modification du tracé de l'accès pour diminuer sa capacité,
- l'aménagement de l'accès par des dispositifs visant à canaliser les véhicules entrants sur une seule file : marquage au sol, balisettes,...

- la mise en place de barrières amovibles visant à fermer provisoirement l'accès,
- la mise en place de feux interrompant périodiquement le flot des véhicules entrants ; ces feux peuvent être mis en service et hors service manuellement, pilotés par une horloge locale, adaptés aux conditions de circulation locales ou régionales.

Bien entendu la régulation par des feux, animés par une stratégie s'adaptant en temps réel aux conditions de circulation, corrélée à un dispositif de contrôle des files d'attente aux accès, paraît être la solution de régulation optimale, mais certaines expériences ont démontré que les autres méthodes pouvaient avoir des effets bénéfiques suffisants. Seule l'analyse au cas par cas des conditions de trafic, des équipements existants et des contraintes technico-économiques doit permettre de déterminer la méthode la plus adaptée.

A. L'aménagement de l'accès

Aménager un accès pour réguler le trafic

Cette méthode de régulation consiste à réduire la capacité de l'accès en canalisant le flux de la rampe sur une seule file au niveau du convergent. Elle est mise en oeuvre par l'utilisation d'un marquage au sol, le plus souvent accompagné de balises imposant le respect de la signalisation au sol.

L'utilisation de balises tend à favoriser naturellement une réduction de la vitesse des automobiles sur l'accès, ce qui influe encore sur la réduction de la demande.

L'aménagement à prévoir dépend totalement de la géométrie de l'accès ; la figure suivante en présente un exemple :

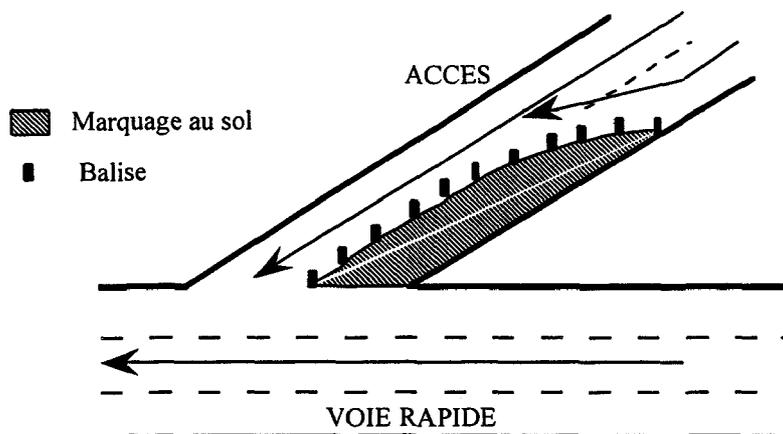


Fig. III.6. : Principe de balisage d'un accès

Le balisage de l'accès peut être considéré comme une stratégie de régulation en tant que telle : il répond aux objectifs consistant à diminuer le débit de rampe et à réduire le nombre de conflits d'insertion.

Une méthode généralisée sur le boulevard périphérique de Paris

Cette méthode de régulation a été évaluée par l'INRETS¹⁷ en 1988. La conclusion de cette étude est qu'elle « a amélioré l'insertion, diminuant ainsi le temps passé en congestion de 41 % ».

Depuis, la Ville de Paris a généralisé cette méthode sur tous les accès du boulevard périphérique, le balisage étant utilisé de plus ici, pour fixer l'angle d'insertion et ainsi favoriser le respect de la priorité à droite.

L'avantage de cette méthode réside essentiellement dans son coût de mise en oeuvre très faible. Cependant, elle ne présente aucune souplesse par rapport aux variations des états du trafic.

¹⁷ H. HAJ SALEM, J.M. BLOSSEVILLE, M.M. DAVEE, M. PAPAGEORGIOU : Alinea un outil de régulation d'accès isolé sur autoroute. Rapport INRETS N°80 - Octobre 1988.

B. La régulation par barrière

Une régulation événementielle

L'installation de barrières aux accès vise à interdire toute utilisation de la rampe d'accès pendant un intervalle de temps relativement important. Par exemple, au Japon les accès sont fermés pendant une demi-heure alors qu'à Lyon les accès sont fermés pour une durée variant de 5 à 10 minutes.

La barrière doit être installée de telle sorte que l'accès soit complètement condamné. De plus, elle doit être accompagnée de dispositifs de sécurité complémentaires : un feu tricolore ou clignotant pour prévenir de l'imminence de la fermeture et des capteurs détectant les véhicules et l'ouverture ou la fermeture anormale...

En complément de ces dispositifs, une information aux usagers doit être diffusée : des panneaux à messages variables doivent être installés sur le réseau de surface aux points de choix pour que les usagers puissent prendre un itinéraire de substitution. Au Japon, les horaires de fermeture des accès sont communiqués aux usagers par la radio.

On peut noter qu'en Ile-de-France, l'exploitation des barrières télécommandées a été abandonnée du fait du trop grand nombre d'incidents aux accès essentiellement liés à des automobilistes mécontents. La plupart des barrières ont été rendues hors d'usage par malveillance. Depuis, les fermetures par barrières sont exceptionnelles et sont accompagnées de la présence des forces de police sur place.

A Lyon, deux accès sur six sont fermés régulièrement à partir du P.C. d'exploitation à l'aide de barrières télécommandées. Ce dispositif est décrit en détail au chapitre 6.

La régulation par barrière est certes efficace pour rétablir rapidement les conditions normales de trafic sur la voie rapide, mais elle est très peu adaptative, un peu « brutale » et mal ressentie par l'usager. Son utilisation devrait être réservée aux zones présentant des contraintes fortes de sécurité.

C. La régulation par feux - Différentes stratégies

La régulation d'accès est ici assurée par un feu situé sur l'accès. Cet équipement a pour effet d'interdire périodiquement l'accès sur la voie rapide durant un temps déterminé dépendant de l'état du trafic avec pour objectif de maintenir la fluidité sur la voie rapide et de renforcer la sécurité au niveau des insertions. Cet équipement permet en outre d'être utilisé (via un rouge permanent commandé manuellement) pour la gestion de situations exceptionnelles : accident grave, fermeture exceptionnelle de l'autoroute, convoi exceptionnel...

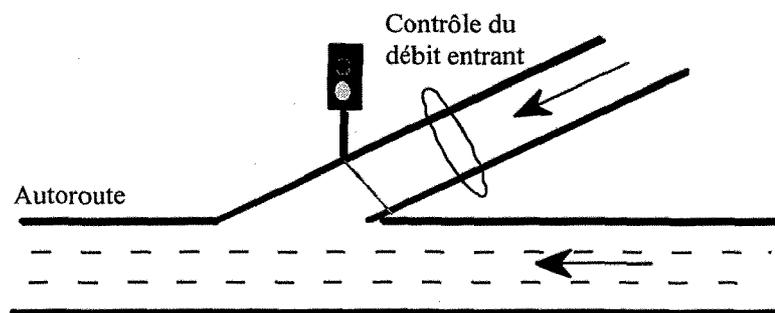


Fig. III.7. : régulation par feux d'un accès autoroutier

Le débit de l'accès est fonction de la durée de cycle et de la durée de vert

Nota : On notera que le mot «jaune clignotant» est utilisé dans ce paragraphe car la réglementation française impose de remplacer le vert par le jaune clignotant sur les feux de régulation des accès aux voies classées autoroutes, car les usagers qui empruntent une bretelle doivent céder le passage à ceux de l'autoroute : art. 26 du Code de la Route.

Le principe de la régulation des accès par feux d'une autoroute ou d'une voie rapide urbaine consiste à découper le flot des véhicules entrants en peloton de taille réduite par l'alternance des phases de rouge et jaune clignotant des feux. Un cycle de feux étant constitué de la succession des deux couleurs jaune clignotant et rouge, deux paramètres permettent d'agir sur le trafic : la *durée du cycle* et la *durée de la phase de jaune clignotant*.

Le débit de l'accès est directement dépendant de la *durée de la phase de jaune clignotant* par cycle.

La *durée de cycle* conditionne la fréquence des pelotons de véhicules entrants : plus le cycle est court, plus les pelotons de véhicules sont de taille réduite et plus on facilite ainsi l'insertion du trafic entrant dans le flot de véhicules de la voie rapide. Par exemple, aux Etats-Unis et aux Pays-Bas, les accès sont très fréquemment régulés par des feux dont le cycle n'autorise qu'un véhicule à la fois (le goutte à goutte).

Un fonctionnement intermittent

Le principal intérêt de la régulation par feux est qu'elle peut n'être active que pendant les heures de la journée connaissant le plus fort trafic. De plus les cycles de feux peuvent être adaptés aux variations de trafic. Cette adaptabilité est prédéfinie dans le cas des stratégies à base de plans de feux fixes (*stratégies feux fixes*), et conditionnée par les mesures du trafic dans le cas des *stratégies adaptatives*.

Des stratégies à cycle de feux fixe

Dans le cas des *stratégies à feux fixes*, le calcul de la durée de jaune clignotant des feux est basé sur l'estimation de la demande moyenne de la rampe, admissible sur l'autoroute et non génératrice de perturbation. Ce calcul est toujours réalisé en différé en utilisant les mesures de trafic de l'autoroute et de l'accès.

C'est la stratégie utilisée sur une quarantaine d'accès en Ile-de-France et dans de nombreux cas aux Etats-Unis. Elle ne nécessite pas de recueil de données du trafic en temps réel mais une réactualisation régulière des cycles de feux, actualisation nécessitant l'organisation de campagnes de mesures des variables de trafic.

La régulation peut être déclenchée automatiquement dans les heures de pointe par l'intermédiaire d'une horloge ou télécommandée manuellement à partir d'un P.C. d'exploitation. Cette dernière configuration est celle décrite au chapitre 6 dans l'exemple du pont de Nogent.

Cependant, il faut noter que cette stratégie, en ne prenant pas en compte les conditions réelles de trafic, peut subir un taux de violation des feux par les usagers plus important.

Des stratégies adaptatives

Par contre, dans le cas des *stratégies adaptatives*, le débit des rampes est calculé en temps réel en tenant compte de l'état du trafic sur l'autoroute et sur la rampe. Ces états de trafic sont caractérisés par les variables : débit (Q), taux d'occupation (T), et vitesse (V). Chaque stratégie adaptative utilise une ou plusieurs de ces variables selon une loi de calcul particulière, mais la plupart sont mises en oeuvre en deux étapes :

- la 1^{ère} étape : calcul du débit «autorisé» de la rampe en fonction des mesures instantanées de trafic (Q, T ou V) et selon les lois de calcul de chaque stratégie,
- la 2^{ème} étape : conversion du débit de la rampe calculé en durée de jaune clignotant.

Des stratégies locales et des stratégies coordonnées

Les stratégies adaptatives existantes peuvent être classées en deux familles :

- les *stratégies locales* : dont la vocation est la régulation au niveau d'un accès isolé,
- les *stratégies coordonnées* : dont la vocation est la régulation du trafic de l'ensemble d'une portion de réseau.

Les *stratégies locales* ne prennent en compte que les conditions de circulation au voisinage de l'accès.

Les *stratégies coordonnées* intègrent simultanément tous les paramètres de trafic de l'axe et des accès et visent à la minimisation du temps total passé par tous les véhicules sur l'autoroute et sur l'accès.

On peut obtenir les effets des stratégies coordonnées par l'utilisation de stratégies locales *synchronisées* entre elles :

- les plans de feux des *stratégies à feux fixes* peuvent être établis, moyennant des études en simulation, en prenant en compte dans leur ensemble, toutes les origines-destinations de la zone considérée et en définissant une stratégie globale de régulation déclinée en terme de débit autorisé pour chaque accès ;
- pour *les stratégies adaptatives*, il suffit qu'une entité de supervision «macroscopique» du trafic, forte de la connaissance des conditions de circulation sur toute l'autoroute, agisse sur certains paramètres de fonctionnement des stratégies locales, moyennant une étude particulière des coefficients de pondération introduits.

Techniques heuristiques et techniques automatiques

Qu'elles soient locales ou coordonnées, les stratégies adaptatives sont établies selon deux techniques :

- les *techniques heuristiques* prescrivant la valeur absolue d'une commande sur la base d'un modèle interprétant des observations empiriques,
- les *techniques automatiques* prescrivant la variation d'un état sur la base d'une loi de comportement chronologique des variations d'état.

Le schéma suivant présente la classification des stratégies de régulation d'accès selon les critères présentés ci-devant.

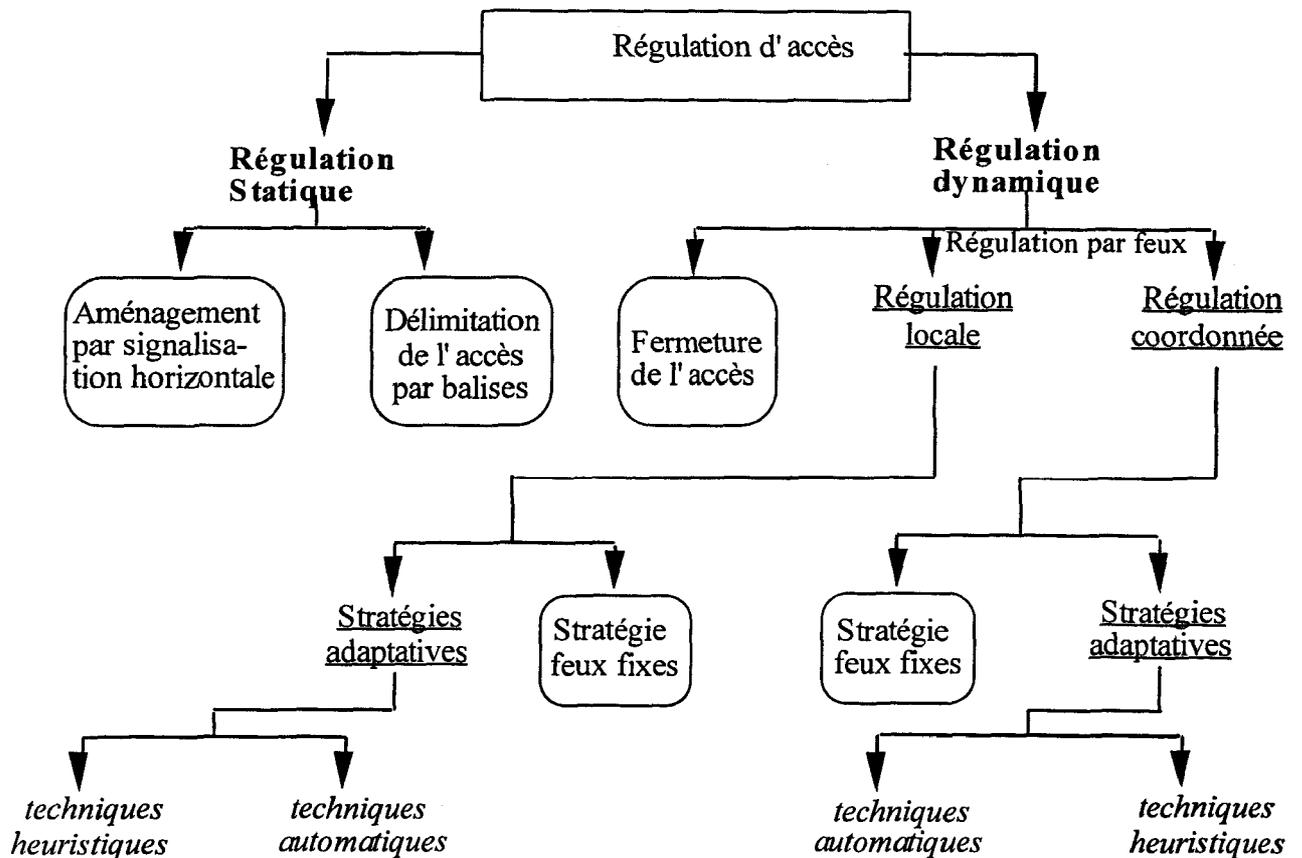


Fig. III.8. : Classification de différentes stratégies de régulation d'accès.

III.5. LES EFFETS SUR LE TRAFIC

Des conséquences multiples sur les conditions de circulation

La régulation des accès d'une voie rapide a des répercussions importantes sur les conditions de circulation sur la voie rapide mais aussi sur la voirie adjacente. Selon les sites, on peut observer les effets suivants :

- réduction des congestions de la V.R.U.,
- amélioration du niveau de service de la V.R.U. : augmentation du débit écoulé et de la distance parcourue,
- augmentation de la vitesse moyenne et réduction des temps de parcours sur la V.R.U.,
- amélioration de la sécurité,

- en corridor, amélioration des conditions de circulation sur les voies parallèles,
- augmentation des temps d'attente aux accès,
- reports de trafic sur le réseau secondaire...

Tous ces effets ne sont pas obligatoirement cumulatifs : certaines conséquences n'ont été observées que sur certains sites. Il est à noter que les études d'évaluation ne mettent en évidence que les phénomènes qui intéressent en particulier les observateurs locaux et qu'il n'existe pas d'étude comparative transversale faisant apparaître l'ensemble des effets de la régulation.

A. Effets sur la Voie Rapide Urbaine

Une réduction des congestions.

L'objectif premier de la régulation des accès est de contrôler la demande pour réduire les congestions de la V.R.U. Cela se traduit par :

- le maintien de la fluidité du trafic sur tout ou partie de cette voie,
- le retard de l'apparition des congestions récurrentes et le retour plus rapide à la fluidité,
- le retour plus rapide à la fluidité lors d'une congestion due à un incident.

La cartographie des congestions relevées sur A10 WEST, lors de l'expérimentation d'Amsterdam montre que :

- les bouchons durent moins longtemps en situation régulée : ils commencent aux environs de 15 heures 45 au lieu de 15 heures 30 et se terminent aux environs de 17 heures 50 au lieu de 18 heures 10 ;
- ils couvrent une distance moins grande : 1,5 km en situation régulée contre 2,5 km en situation non régulée.

Une étude menée en 1993 sur 3 accès du boulevard périphérique de Paris par l'INRETS¹⁶ compare les effets sur le trafic de la stratégie adaptative ALINEA de régulation par feux par rapport à une situation sans régulation. Elle fait également apparaître une nette diminution des congestions récurrentes avec la suppression quasi totale des pics de congestion (taux supérieur à 50%) en situation régulée. .

La régulation d'accès a donc pour effet de répartir dans le temps la demande sur les accès et d'absorber ainsi les pointes de trafic.

On peut noter que l'étude de l'INRETS conclut aussi que les gains de la régulation sont particulièrement significatifs lors des congestions dues aux incidents et accidents.

Une amélioration du niveau de service.

La régulation des accès, en contrôlant la demande de telle sorte que le trafic se situe sous le seuil de saturation, améliore globalement le rendement de la voie rapide. De nombreuses études américaines sur le sujet font état d'une augmentation significative du débit de la V.R.U., de l'ordre de 25 %, après mise en service de la régulation d'accès, (voir exemples dans ce chapitre).

L'étude de l'INRETS déjà citée note que la régulation des accès génère une augmentation de la distance parcourue sur le tronçon régulé de l'ordre de 8% .

Un gain pour les usagers.

La réduction des temps de parcours et l'augmentation des vitesses moyennes sont des effets très fréquemment cités par les utilisateurs de régulation.

Outre les chiffres cités dans la bibliographie américaine qui font état de l'augmentation de la vitesse moyenne entre 15 et 35 %, on peut citer l'expérience INRETS qui mentionne une augmentation de 22 % de la vitesse moyenne sur le tronçon régulé du boulevard périphérique de Paris.

¹⁶ H HAJ SALEM : Evaluation de l'impact du contrôle d'accès sur le Corridor périphérique. INRETS - Novembre 1993

Par ailleurs, l'expérimentation d'Amsterdam fait état d'un gain significatif pour les usagers par la réduction moyenne de 19 % des temps de trajet via l'axe régulé. Cette expérience présente un intérêt particulier puisqu'elle mesure globalement les temps de trajet moyens vus de l'utilisateur, en incluant les temps d'attente aux accès et les temps de parcours sur la V.R.U.

L'amélioration de la sécurité

La diminution du nombre d'accidents est une constante qui revient dans tous les articles américains consacrés à la régulation des accès. Certains chiffres font état de la réduction du nombre d'accidents de l'ordre de 25 à 50 %.

Nous ne disposons pas d'études, provenant d'autres régions du monde, sur les apports de la régulation en matière de sécurité. Nous ne pouvons que prendre acte des chiffres fournis, tout en sachant qu'ils ne sont vraisemblablement pas transposables en l'état : la topologie des autoroutes américaines et les habitudes de conduite sont trop différentes de ce que nous rencontrons sur nos autoroutes. Cependant, on peut raisonnablement penser qu'en France aussi, la régulation des accès ait un effet bénéfique en matière de sécurité par sa contribution à la réduction des conflits d'insertion.

B. Effets sur le réseau de surface

Eléments de problématique

La régulation des accès à une voirie rapide est souvent destinée à être mise en œuvre dans des secteurs urbanisés où les problèmes d'interface avec le réseau de surface sont aigus.

En effet, en milieu urbain et périurbain, poursuivre le seul objectif de fluidité de la voie rapide au profit des usagers en transit pourrait conduire à un engorgement généralisé et incontrôlé du réseau, les voies dites de surface n'étant pas capables de supporter un report significatif du trafic local drainé par l'autoroute.

Dans un tel cas, les objectifs des différents exploitants peuvent donc s'avérer divergents. C'est pourquoi, les stratégies adoptées doivent intégrer non seulement la voie rapide, mais également le réseau de surface associé. Ainsi, ces stratégies ne se limitent pas aux

seuls accès. La régulation exige souvent une coordination avec les feux du réseau urbain, voire un renforcement par des informations et un jalonnement dynamique sur ce même réseau. Différentes techniques, détaillées plus loin (V.3) explicitent les dispositifs utilisables dans ce cadre.

Les effets induits sur la voirie parallèle

A Paris, un des résultats les plus inattendu de l'étude INRETS concerne le trafic sur la voirie parallèle. Elle montre que la régulation des accès produit des effets bénéfiques non seulement sur le trafic du boulevard périphérique mais également sur celui des boulevards des Maréchaux, parallèles au boulevard périphérique. En effet la vitesse moyenne sur ces boulevards a été augmentée de 16 % durant le temps de l'expérimentation. Ceci montre que l'amélioration des conditions de circulation sur la voie rapide peut induire une répartition plus optimale du trafic sur l'ensemble du corridor.

L'augmentation des temps d'attente aux accès

Bien entendu, la rétention des véhicules sur les rampes d'accès provoque un temps d'attente supplémentaire pour certains usagers de ces bretelles (l'étude INRETS met en évidence une augmentation du temps passé de 8 % sur les radiales accédant au boulevard périphérique). Cependant cette attente est pondérée par le fait que le temps de parcours sur la voie rapide est plus court. Le cas d'Amsterdam démontre que l'usager peut être gagnant globalement sur un trajet empruntant un accès régulé et la voie rapide. D'une manière générale, les temps de parcours doivent être abordés d'une façon globale.

L'allongement des files aux accès

Corrélativement aux temps d'attente, les files d'attente aux accès ont tendance à s'allonger. Il est clair que l'allongement des files d'attente peut s'il n'est pas contrôlé, générer des bouchons sur la voirie de surface. Des dispositifs de mesure de la file d'attente sont très souvent couplés aux dispositifs de régulation : lorsque la file d'attente atteint sa limite maximale tolérable, la régulation est alors momentanément débrayée.

Lors de l'expérience d'Amsterdam, des mesures systématiques ont été relevées sur chaque accès. On peut en tirer l'analyse suivante :

- sur les accès où il n'y a pas de queue en situation non régulée, la régulation introduit des files d'attente limitées durant toute la période de régulation. Cependant sur ces accès, on constate que les temps d'attente lors des pics de congestion sont inférieurs en situation régulée à ceux constatés en situation non régulée ;
- sur les accès où l'attente est habituellement importante, la régulation a plutôt tendance à maintenir ou à réduire les files d'attente (il semble que les queues soient provoquées dans ce cas par le bouchon de la voie rapide).

Le report de trafic

Lorsque le temps d'attente aux accès devient trop important relativement au temps de trajet habituel de l'utilisateur, celui-ci peut avoir tendance à modifier son itinéraire pour rejoindre un autre accès, ou même emprunter le réseau de surface pour rejoindre sa destination. Effectivement, on constate que la régulation d'accès privilégie les trajets longs sur la voie rapide par rapport aux trajets courts dits «de cabotage», cela pouvant d'ailleurs correspondre à un choix d'exploitation.

L'expérience d'Amsterdam a tenté de mesurer ces phénomènes de reports en comptabilisant le nombre de véhicules à chaque accès. Il semble qu'en situation de régulation, des reports entre accès se soient opérés, en particulier entre deux accès consécutifs (environ 10% du trafic de l'accès S104 s'est reporté vers l'accès S102) ; cependant les mesures ne montrent pas de «déperdition» de trafic : au contraire, on constate que globalement un peu plus d'utilisateurs sont entrés sur la voie rapide via les accès régulés (18 599 en situation régulée par rapport à 18 162 en situation normale : chiffres moyens relevés entre 14 heures et 20 heures durant la période d'expérimentation).

IV. LES STRATEGIES DE REGULATION ADAPTATIVES

Ce chapitre décrit les méthodes de calcul du débit «autorisé» sur l'accès d'un certain nombre de stratégies adaptatives locales et coordonnées connues. La mise en oeuvre pratique de ces stratégies avec en particulier la méthode de calcul de la durée de jaune clignotant à partir du débit calculé sera abordée au chapitre suivant.

On notera que le mot «durée de vert» est utilisé dans ce chapitre dans un souci de clarté. Il est impropre dans la pratique car la réglementation française impose de remplacer le vert par le jaune clignotant sur les feux de régulation des accès aux voies classées autoroutes, car les usagers qui empruntent une bretelle doivent céder le passage à ceux de l'autoroute ; art. 26 du Code de la Route.

IV.1. LES STRATEGIES LOCALES

A. Stratégie Demande Capacité Standard (DCS)

Le principe de fonctionnement de cette stratégie adaptative consiste à calculer en temps réel, le débit d'accès (Q_r), nécessaire pour atteindre la capacité (Q_{max}) de l'autoroute à l'aval par différence avec le débit mesuré à l'amont (Q_{am}). La capacité est déterminée au préalable à l'aide du diagramme fondamental mesuré au niveau de la station à l'aval : débit maximum observé dans la relation débit - taux d'occupation. Le débit amont est mesuré en temps réel sur le capteur amont. La mesure en temps réel du taux d'occupation aval permet de détecter la formation des congestions et de déterminer ainsi un débit de rampe minimal «autorisé».

Le débit de rampe Q_r est calculé par la relation suivante :

$$Q_r = \beta (Q_{\max} - Q_{\text{am}}) + (1 - \beta) Q_{\text{min}}$$

avec :

- Q_r = débit de rampe calculé
- Q_{\max} = capacité à l'aval
- Q_{am} = débit amont mesuré
- Q_{min} = débit de rampe minimum en cas de congestion. (dans l'idéal, il est égal à la différence entre les deux capacités amont et aval, mais dans la pratique il doit tenir compte de la capacité maximale de stockage de la rampe).
- β = constante prenant les valeurs 0 ou 1 selon l'état de trafic à l'aval de l'accès défini par le taux d'occupation (T_{av}) mesuré : $\beta = 1$ si le trafic est fluide, $\beta = 0$ s'il y a congestion.

Cette stratégie adaptative est très utilisée aux Etats-Unis. Elle nécessite deux stations de mesure du débit et du taux d'occupation : l'une à l'amont de l'accès et la deuxième à l'aval.

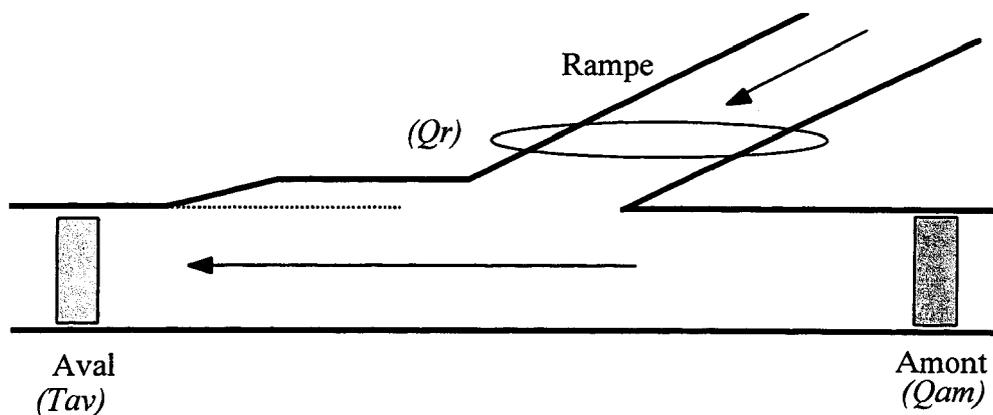


Fig. IV.1. : Equipement d'un accès pour une stratégie DCS

Paramètres de réglage : (basés sur l'identification précise des diagrammes fondamentaux des stations amont et aval).

- les capacités de rampe (Q_{min}) et à l'aval (Q_{max});
- le taux d'occupation critique aval déterminant le seuil de congestion, nécessaire pour fixer le coefficient β ;

Avantages :

- prise en compte des variations du trafic en temps réel;

Inconvénients: - fonctionne en «boucle ouverte» (pas de mesure du résultat de la commande).

B. Stratégie Demande Capacité INRETS (DCI)

Testée sur le boulevard périphérique en 1988, cette stratégie est une variante de la demande capacité standard (DCS) qui permet de prendre en compte l'état de la congestion au niveau de l'accès. La relation est la suivante, permettant de différencier quatre états de trafic :

$$Q_r = \alpha [\beta Q_{max} + \Gamma(1-\beta) Q_{av} - Q_{am}] + (1-\alpha) Q_{min}$$

- En régime fluide ($\alpha = \beta = \Gamma = 1$) : le calcul du débit de rampe Q_r est identique au calcul de la DCS : $Q_r = Q_{max} - Q_{am}$.
- En cas de congestion en aval ($\alpha = \Gamma = 1$; $\beta = 0$; $Q_r = Q_{av} - Q_{am}$) ; la stratégie DCI améliore le calcul de débit de rampe Q_r . En effet, lors de l'apparition d'une congestion à l'aval, cette stratégie utilise le débit aval mesuré (Q_{av}) à la place de la capacité (Q_{max}) : $Q_r = Q_{av} - Q_{am}$.
- Dans le cas où la congestion remonte jusqu'au convergent ($\alpha = 1$; $\Gamma = 0.9$; $\beta = 0$) : la consigne est multipliée par un facteur Γ (< 1) afin de réduire progressivement le débit de l'accès : $Q_r = \Gamma Q_{av} - Q_{am}$.
- Si la congestion continue sa remontée jusqu'à la station amont ($\alpha = 0$; $\Gamma = 0$) : la stratégie impose un débit de rampe minimum (Q_{min}) : $Q_r = Q_{min}$.

Cette stratégie nécessite trois stations de mesure sur l'autoroute : la première à l'aval de l'accès mesurant le débit aval (Q_{av}) et le taux d'occupation (T_{av}), la seconde au niveau du convergent mesurant le taux d'occupation (T_{co}) et la troisième à l'amont mesurant le débit amont (Q_{am}) et le taux d'occupation (T_{am}) afin de mieux suivre la progression des congestions.

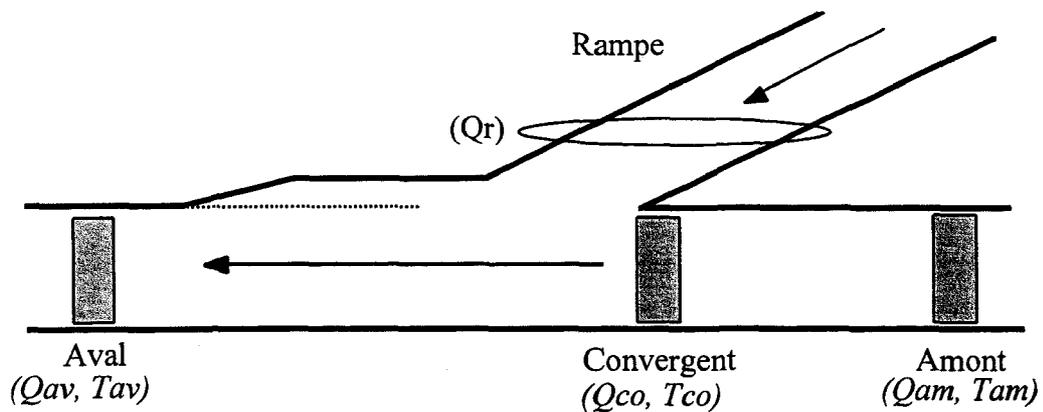


Fig. IV.2. : Equipement d'un accès pour une stratégie DCI

Paramètres de réglage : (en fonction des diagrammes fondamentaux)

- la capacité aval (Q_{max})
- le taux d'occupation critique (déterminant le seuil de saturation) de chacune des trois stations
- le paramètre Γ (en général valant 0,9 lorsqu'il ne vaut pas 0 ou 1).

Avantages :

- suivi assez fin de la propagation des congestions

Inconvénients:

- recueil des données assez dense (trois stations sur l'autoroute)

C. Stratégie Taux d'occupation

Cette stratégie est utilisée sur plusieurs sites américains (Chicago, Los-Angeles, ...) car elle est très économique en nombre de capteurs. En effet, le débit de rampe (Q_r) est calculé en utilisant la mesure du taux d'occupation d'une seule station située à l'amont (voire d'un seul capteur central) du convergent de l'accès (à environ 50 mètres).

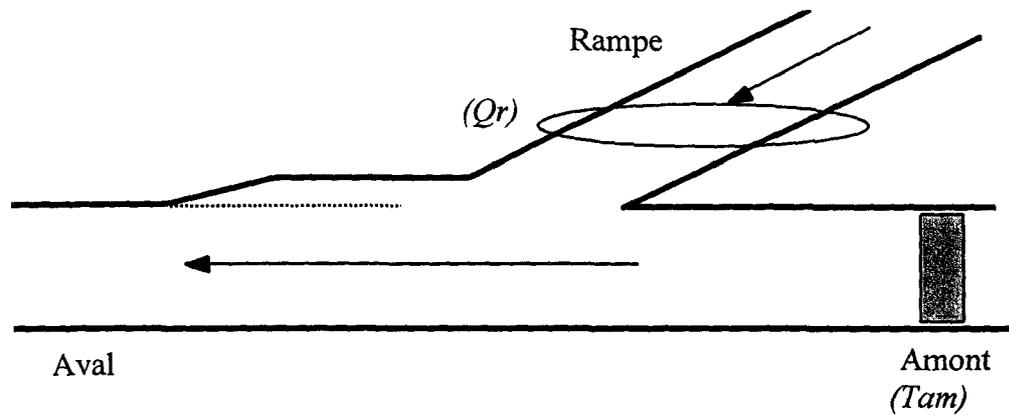


Fig. IV.3. : Implantation des capteurs de la stratégie taux d'occupation

Comme dans les stratégies Demande Capacité, le principe de la stratégie taux d'occupation s'appuie sur une loi de commande définissant le débit de rampe (Q_r) comme le complément du débit amont mesuré pour atteindre la capacité de l'autoroute à l'aval. Mais pour simplifier cette loi, on assimile la «partie fluide» du diagramme fondamental à une droite, ce qui permet de déterminer le débit de rampe autorisé (Q_r) en fonction du taux d'occupation mesuré (T_{am}) : le débit de rampe (Q_r) est inversement proportionnel au taux d'occupation amont (T_{am}) mesuré.

Cette approximation est vérifiée dans une plage de fonctionnement comprise entre un seuil bas (S_b) et un seuil haut (S_h ou seuil critique) de taux d'occupation.

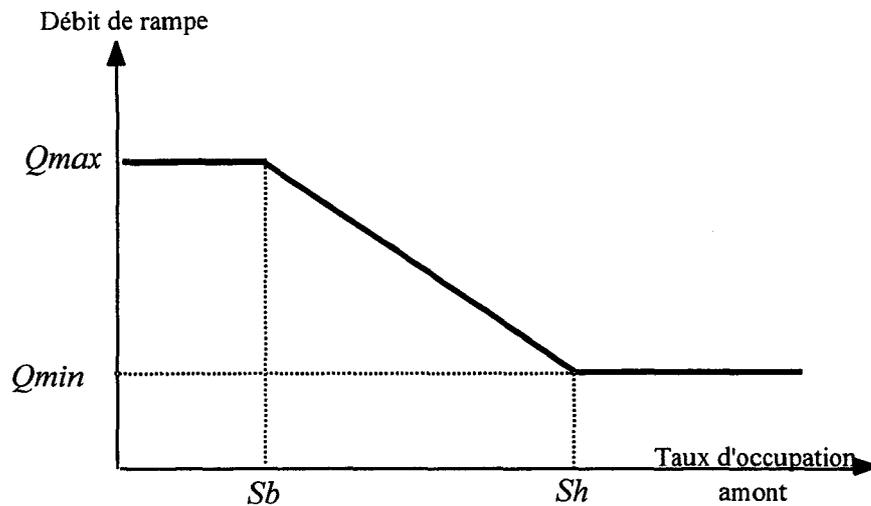


Fig. IV.4. : Débit de rampe en fonction du taux d'occupation amont mesuré

La loi de commande est régie par la relation :

$$Q_r = \beta p (T_{am} - S_h) + Q_{min}$$

avec :

T_{am} = taux d'occupation mesuré à l'amont

S_h, S_b = respectivement le seuil haut et le seuil bas du taux d'occupation amont.

p = pente de la droite de commande : $p = (Q_{min} - Q_{max}) / (S_h - S_b)$

β = constante dépendant de l'état du trafic au niveau de la boucle amont

:

en situation fluide $\beta = 1$, en situation saturé $\beta = 0$

Paramètres de réglage : (le bon fonctionnement de cette stratégie est conditionné par le calibrage assez précis des diagrammes fondamentaux mesurés à l'amont et à l'aval de l'accès, pour déterminer les paramètres suivants de la droite de commande)

- le seuil bas (S_b) et le seuil haut (S_h) du taux d'occupation amont,
- le débit de commande maximum (Q_{max}) et minimum (Q_{min}).

- Avantages :*
- simplicité de mise en oeuvre (une table de correspondance de Q_r en fonction du taux mesuré peut suffire)
 - faible coût d'installation (1 seule station de mesure)
- Inconvénients :*
- compte tenu de la position de la boucle de mesure située à l'amont du convergent, cette stratégie réagit souvent trop tard à l'apparition des congestions en aval de l'accès.

D. Stratégie anglaise de Wotton & Jeffreys (W&J)

Développée dans le cadre du système urbain de régulation anglais SCOOT, cette stratégie possède les deux caractéristiques suivantes :

- Un fonctionnement en temps réel,
- Une capacité variable à l'aval selon l'état du trafic.

Fonctionnement en temps réel : Comme les autres stratégies, son fonctionnement est basé sur la mesure du débit amont (Q_{am}) complétée par le débit de rampe (Q_r) pour atteindre la capacité (Q_{max}) de l'autoroute à l'aval. Cette mesure, effectuée chaque seconde et agrégée sur 3 minutes glissantes, conditionne directement le basculement des feux :

Si $Q_r + Q_{am} > Q_{max}$ alors commutation des feux de la rampe au rouge

Si $Q_r + Q_{am} < Q_{max}$ alors commutation des feux de la rampe au vert

Les durées de rouge et de vert ainsi déterminées sont bornées par des valeurs minimales et maximales. Ainsi cette stratégie met en oeuvre des durées de cycles et des durées de phases complètement variables dans des limites prédéfinies.

La capacité variable : Contrairement aux autres stratégies, la capacité (Q_{max}) de l'autoroute à l'aval n'est pas fixée comme une constante mais est définie par la mesure et le calcul instantané du débit (Q_{av}) et de la vitesse (V_{av}) à l'aval. La relation entre Q_{max} et le couple débit-vitesse mesuré est réalisée par une matrice prédéfinie : «la matrice de

capacité», extraite du diagramme fondamental de la station à l'aval, incluant la dispersion autour de cette relation.

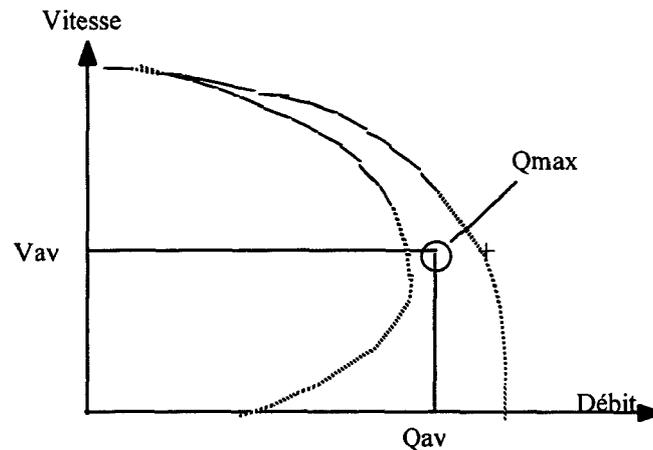


Fig. IV.5. : Vitesse à l'aval en fonction du débit aval

La mise en oeuvre de cette stratégie nécessite 3 stations : une station de mesure sur la rampe et une station de mesure à l'amont pour la mesure de la demande, une station de vitesse à l'aval pour la détermination de la capacité.

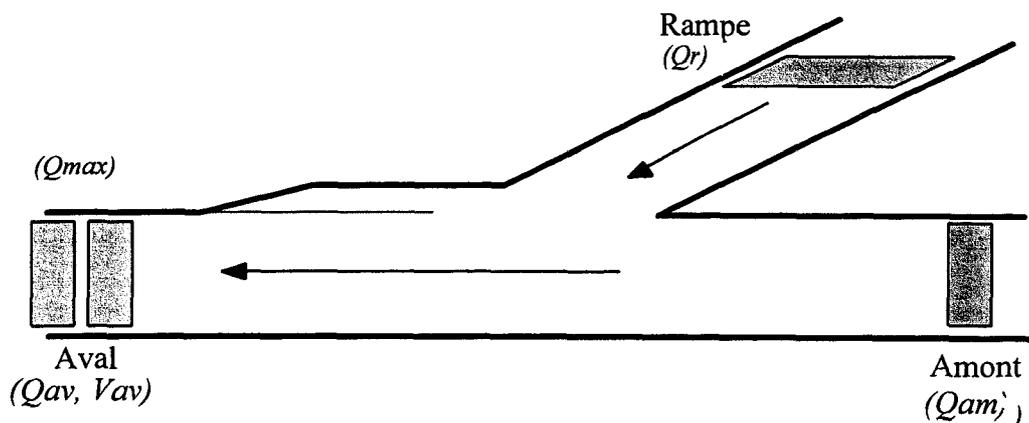


Fig. IV.6. : implantation des capteurs pour la stratégie W&J

- paramètres de réglage:-
- capacité à l'aval : Wotton & Jeffreys ont développé un logiciel spécifique pour le calibrage de la matrice de capacité, nécessitant au minimum les débits et vitesses recueillis pendant deux mois
 - durée minimale et maximale de Vert
 - durée minimale et maximale de Rouge

- Avantages :*
- grande réactivité
 - grande optimisation du nombre de véhicules entrants
- Inconvénients:*
- calibrage très difficile et délicat nécessitant un recueil de données important
 - nombreux capteurs nécessaires
 - mise à disposition des données du recueil chaque seconde
 - pas d'autonomie de fonctionnement, notamment en fonctionnement dégradé (puisque qu'il n'y a pas de notion de cycle : l'arrêt du recueil interdit immédiatement le fonctionnement des feux, contrairement aux autres stratégies dont les feux peuvent continuer à fonctionner sur les dernières valeurs de cycles calculées).

E. Stratégie hollandaise du Rijkswaterstaat (RWS)

Stratégie mise en oeuvre aux Pays-Bas sur quatre accès en amont du Coen tunnel d'Amsterdam, elle est équivalente dans son principe à la stratégie Demande Capacité Standard : le débit de rampe est déterminé par la mesure du débit amont et de la capacité maximale à l'aval. Cependant les congestions sont détectées à l'aide de mesures de vitesse en amont et en aval de l'accès. C'est la relation suivante qui est appliquée.

$$Q_r = \beta (Q_{max} - Q_{am}) + (1 - \beta) Q_{min}$$

avec :

- Q_r = débit de rampe calculé
- Q_{max} = Capacité à l'aval
- Q_{am} = débit amont mesuré
- Q_{min} = débit de rampe minimum en cas de congestion.

β = constante binaire prenant les valeurs 0 ou 1 selon les vitesses mesurées à l'aval et à l'amont de l'accès. ($\beta = 1$ = fluide; $\beta = 0$ = congestionné)

La congestion de l'autoroute est détectée par la mesure des deux vitesses à l'amont et à l'aval de l'accès : si ces deux vitesses mesurées sont inférieures à 35 Km/h, la stratégie impose un débit de rampe minimum (Q_{min}).

Au delà d'un seuil maximal de vitesse (indiquant la fluidité), la régulation des accès est désactivée (seuil de déclenchement).

Le schéma suivant présente l'implantation des capteurs nécessaires au fonctionnement de cette stratégie. A noter que cette stratégie est mise en oeuvre à Amsterdam dans un mode de fonctionnement «véhicule par véhicule».

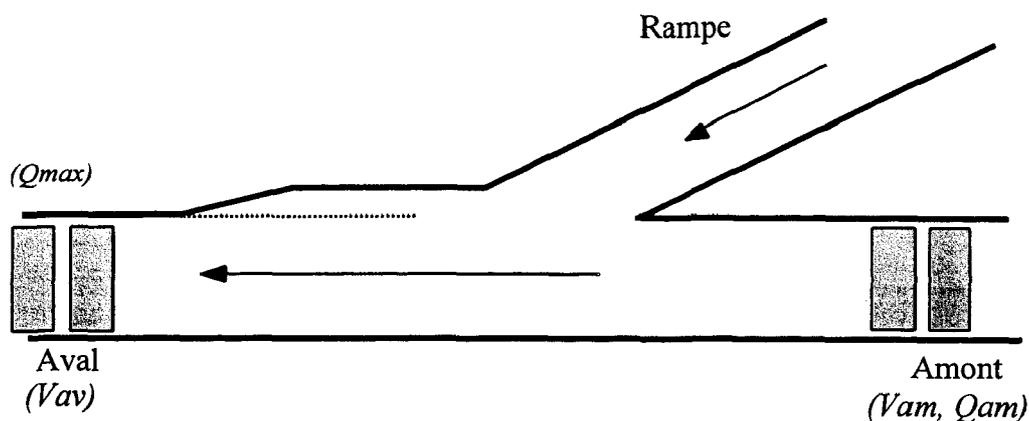


Fig. IV.7. : Implantation des capteurs dans la stratégie RWS

- paramètres de réglage:*
- capacité à l'aval (Q_{max}) à l'aide du diagramme fondamental
 - débit minimal en cas de saturation sur l'autoroute (Q_{min})
 - seuil de vitesse (V_{min}) permettant la détection d'une saturation sur l'autoroute.

Avantages :

- fonctionnement et calibrage aisé

- Inconvénients:*
- recueil de données assez dense (deux stations de vitesse sur l'autoroute)
 - mêmes inconvénients que la demande capacité standard

F. Stratégie ALINEA

Cette stratégie a été développée par l'INRETS. Testée en France sur le boulevard périphérique de Paris, à Amsterdam et au Royaume-Uni et comparée à plusieurs autres stratégies, elle a, de toutes les expérimentations, donné les meilleurs résultats.

Le principe d'ALINEA consiste à maintenir le débit à l'aval de l'accès à une valeur optimale par la mesure du taux d'occupation aval et le contrôle du débit de la rampe. La valeur optimale est déterminée par le diagramme fondamental liant débit et taux d'occupation : le débit maximum correspond à la consigne de la stratégie.

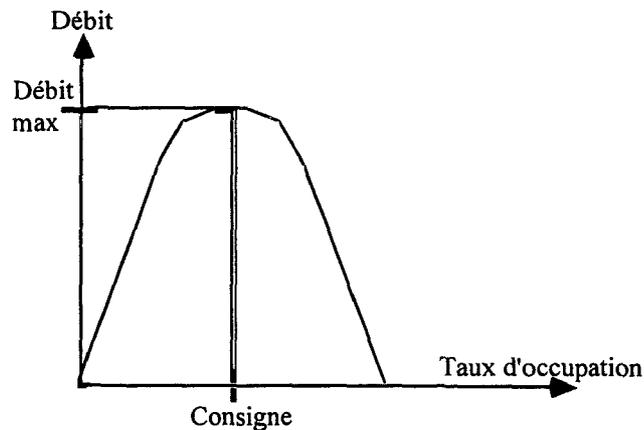


Fig. IV.8. : Diagramme fondamental et consigne pour la stratégie ALINEA

la stratégie ALINEA obéit aux principes des «systèmes asservis du premier ordre»: ainsi, le débit de rampe calculé (Qr_k) à l'instant k est régi par la relation suivante :

$$Qr_k = Qr_{k-1} + \beta (Tcr - Tav_k)$$

C'est à dire que le débit (Q_{r_k}) de l'accès, calculé à l'instant k est fonction du débit au pas précédent ($Q_{r_{k-1}}$) et de l'écart entre le taux d'occupation optimal T_{cr} (consigne) et le taux d'occupation aval mesuré T_{av_k} multiplié par (β) correspondant au gain du système.

La mise en place d'ALINEA nécessite l'installation d'une station de mesure à l'aval de l'accès.

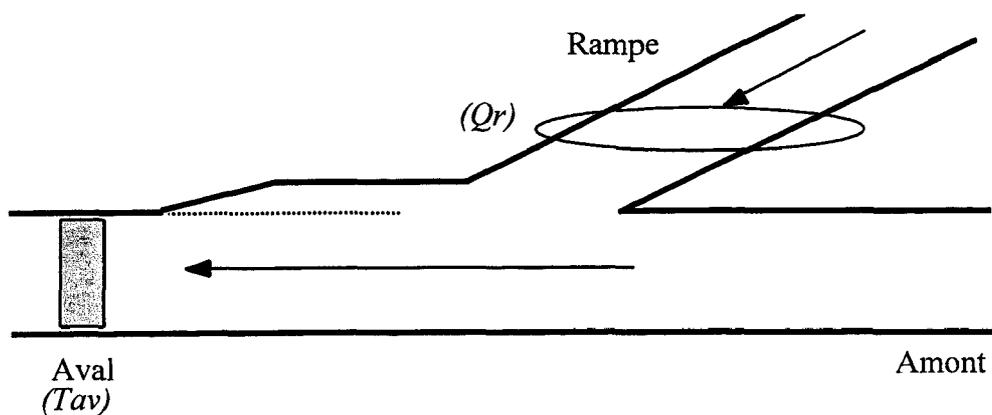


Fig. IV.9. : implantation des capteurs pour la stratégie ALINEA

paramètres de réglage:

- le taux d'occupation optimal (T_{cr}) à l'aide du diagramme fondamental de la station en aval ;
- le gain de boucle (β). Plus ce coefficient est faible, plus la commande des feux est en retard sur l'apparition des congestions ; plus il est important et plus la commande est réactive, provoquant des instabilités. Le réglage de ce coefficient est à réaliser sur le terrain.

Avantages :

- recueil de données minimal : 1 seule station de recueil sur l'autoroute
- fonctionnement en boucle fermée, ayant des effets autocorrecteurs
- stable si le réglage est optimal.

- Inconvénients :*
- réglage peu aisé des paramètres en particulier le coefficient β
 - risque d'instabilité.

NOTA : L'INRETS préconise de fixer la durée du cycle à 40 secondes. La valeur conseillée pour le coefficient β est de 70 véhicules/40 secondes soit 6300 véhicules/heure.

IV.2. PRESENTATION DES STRATEGIES COORDONNEES

A. La coordination

L'objectif de la mise en oeuvre d'une stratégie locale est de maîtriser localement l'état du trafic sur l'autoroute en prenant en compte les conditions de circulation immédiatement au niveau de l'accès. En revanche, contre l'objectif d'une stratégie coordonnée est d'optimiser globalement la capacité d'une portion importante de la voie rapide en ajustant simultanément les débits entrants sur plusieurs rampes et en répartissant les temps d'attente sur les différents accès. En principe, une stratégie coordonnée prend en compte l'ensemble des conditions instantanées du trafic sur le réseau, c'est à dire qu'elle utilise l'ensemble des stations de mesures situées sur l'axe et les accès.

A priori, une stratégie coordonnée prend en compte plus efficacement les congestions accidentelles. En effet, si une congestion consécutive à un accident ou incident survient loin en aval d'un accès régulé, la stratégie locale ne peut réagir que lorsque la congestion atteint les stations de mesures gérant l'accès. Par contre dans le cas d'une régulation coordonnée, cet événement est pris en compte beaucoup plus tôt et la mise en oeuvre de la régulation intervient sur tous les accès amont.

A noter que si l'on dispose d'un système de supervision du trafic automatique analysant les conditions de circulation sur l'ensemble de la section régulée, il est possible de mettre en oeuvre une «pseudo-coordination» (ou plutôt une synchronisation) des stratégies locales par la modification instantanée d'un paramètre fixé comme une constante pour le fonctionnement local : seuil bas ou seuil haut de régulation, taux d'occupation critique,

durée minimale de vert ou de rouge, débit minimum... Cependant, la définition de la nouvelle valeur du paramètre peut s'avérer complexe et nécessiter des essais en simulation.

La modification est réalisée par un dispositif automatique (voire un exploitant) analysant d'une manière macroscopique les conditions de circulation sur l'ensemble de la section régulée.

Cette méthode de coordination est décrite dans la suite de ce chapitre, car sa mise en oeuvre peut être envisagée et répondre aux objectifs d'exploitation dans un bon nombre de cas.

B. Stratégie hollandaise du Rijkswaterstaat synchronisée (RWS COR)

A Amsterdam, une des stratégies coordonnées utilisées consiste à lier le déclenchement de la stratégie RWS sur un accès à l'état de la régulation sur des autres accès à l'aval. Lorsqu'un accès bascule en mode régulé local, quand le seuil de vitesse de déclenchement est atteint, une alarme est émise vers le P.C. de supervision et soumise à un exploitant. Celui-ci peut alors rendre opérationnelles les stratégies locales de tous les accès à l'amont, qui ne pourront être désactivées que sur un ordre de l'exploitant.

Il s'agit ici en fait d'une coordination du déclenchement des stratégies locales.

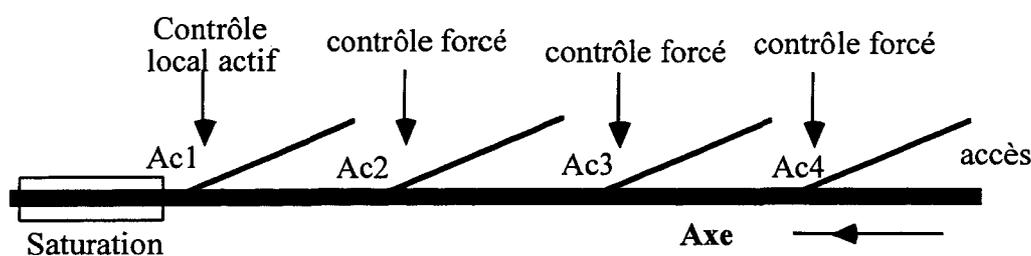


Fig. IV.10. : Coordination des régulations d'accès RWS

La table d'état des accès est la suivante en mode synchronisé :

accès :	Ac1	Ac2	Ac3	Ac4
	0	0	0	0
	0	0	0	1L
	0	0	1L	1F
	0	1L	1F	1F
	1L	1F	1F	1F

avec : contrôle actif local = 1L

forcé = 1F

pas de contrôle = 0

Dans cette méthode chaque stratégie a un fonctionnement autonome, la décision de coordination revient à un opérateur qui fait lui-même l'analyse macroscopique du trafic. Le forçage est ici réalisé par une commande particulière qui active la stratégie locale de régulation bien que le seuil de vitesse permettant un déclenchement automatique ne soit pas atteint.

Avantages :

- on conserve les automatismes des stratégies locales
- cette méthode de coordination est simple
- elle ne nécessite pas de systèmes particuliers au niveau macroscopique en dehors des outils classiques de supervision du trafic (caméras et synoptique animé).

inconvénients:

- pas d'automatisme de coordination
- elle conserve les inconvénients de la stratégie RWS

C. Stratégie ALINEA synchronisée

La «synchronisation» des stratégies locales ALINEA a été étudiée dans le cadre de l'expérimentation d'une régulation d'accès adaptative sur l'autoroute A6, mais n'a pas été

mise en oeuvre. Son principe est présenté ici afin de montrer des possibilités de synchronisation de stratégies locales.

Le principe de cette coordination consiste à anticiper la régulation d'accès sur les accès encore fluides dès la détection d'un début de congestion sur les accès en aval, tout en conservant sur ces accès les principes d'une régulation adaptative locale.

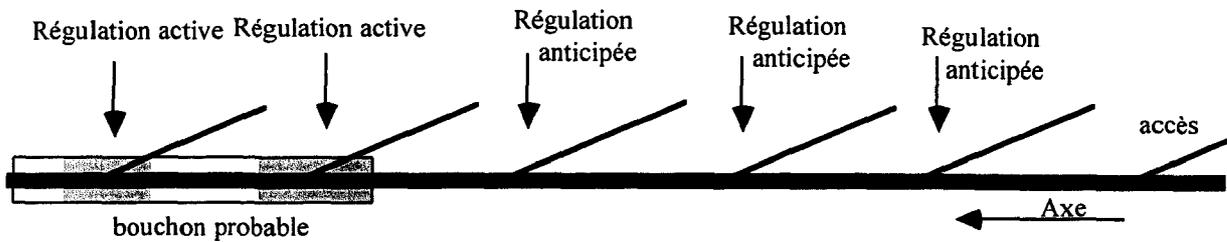


Fig. IV.11. : anticipation du contrôle

Le principe de cette anticipation consiste à asservir le fonctionnement des stratégies locales ALINEA en amont d'un accès saturé par le remplacement automatique de la consigne (taux d'occupation optimal) de chacun des accès en amont par une consigne dégradée, en fonction d'une table de décision fixée. Cette consigne dégradée va avoir pour conséquence d'autoriser un débit entrant plus faible sur ces rampes.

Le schéma suivant présente le diagramme fondamental d'un accès, la consigne et la ou les consignes dégradées.

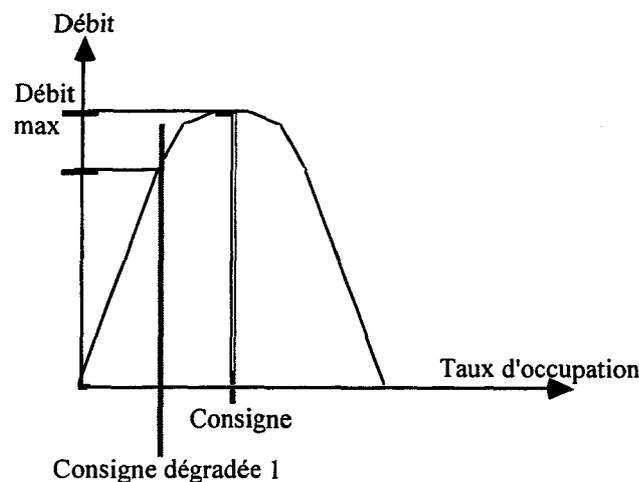


Fig. IV.12. : modification de la consigne

Chaque accès possède une zone d'influence, c'est à dire, en cas de saturation : la liste des accès en amont subissant une dégradation de la consigne de régulation.

Calibrage : le calibrage de la stratégie synchronisée consiste à définir pour chacun des accès :

- les seuils de saturation (taux d'occupation) qui permettent de déclencher la synchronisation ;
- les zones d'influence pour une saturation locale et pour une situation de bouchon, c'est à dire par accès à l'aide de matrice O/D : la liste des accès concernés en amont et leur consigne dégradée respective.

Avantages :

- on conserve les automatismes des stratégies locales ALINEA ;

- cette méthode de synchronisation est automatique ;
- elle ne nécessite pas de capteurs supplémentaires ;
- la synchronisation est progressive par rapport aux situations de bouchons ;
- en cas d'accident, un opérateur peut activer la synchronisation des accès situés à l'amont, simplement en désignant le point d'accident.

Inconvénients :

- le lien entre seuil de saturation et consigne dégradée est difficile à établir et nécessite vraisemblablement des études en simulation.

- la coordination ne se déclenche que sur les situations de trafic au niveau des accès : il n'y a pas d'analyse des situations de trafic sur toute l'autoroute et notamment entre les accès.

D. Stratégie METALINE

Mise au point par l'INRETS et expérimentée sur le Boulevard Périphérique de Paris et à Amsterdam, la stratégie METALINE est une stratégie très puissante visant à réguler une section complète d'autoroute en optimisant globalement le temps passé de tous les véhicules sur l'autoroute et les accès. Elle s'appuie sur une loi de commande tenant compte instantanément de tous les états de trafic de la section considérée.

Cette stratégie est une généralisation de la stratégie ALINEA ; elle s'appuie sur une équation qui calcule simultanément les débits de rampe sur tous les m accès en fonction du taux d'occupation mesuré sur toutes les n stations de l'axe :

$$Qr_k = Qr_{k-1} - k_1 (O_k - O_{k-1}) - k_2 (T_k - T_{cr})$$

avec :

Qr_k	vecteur constitué des débits calculés sur m accès à l'instant k
k_1	matrice de gain de dimension m X n
k_2	matrice de gain de dimension m X m
O_k	vecteur des taux d'occupation mesurés sur les n stations à l'instant k
T_k	vecteur des taux d'occupation mesurés aux m accès à l'instant k
T_{cr}	vecteur des taux d'occupation critiques des m accès

C'est à dire que le débit de rampe Qr sur un accès est influencé par le taux d'occupation mesuré par tous les capteurs de l'autoroute et le débit des autres accès.

La démarche utilisée pour le développement de cette stratégie globale est basée sur l'application de la théorie du calcul de la commande Linéaire Quadratique (LQ). Elle nécessite l'application des méthodes classiques de résolution de ce type de problème : la résolution des équations de Ricatti.

Cette stratégie nécessite donc la mesure en temps réel des taux d'occupation de tous les capteurs de la zone d'évaluation et le calibrage des deux matrices de gain K_1 et K_2 . La

mise en oeuvre et le calibrage de cette stratégie sont très complexes et nécessitent des études en simulation.

Avantages :

- la section d'autoroute à réguler est vue comme un système intégré où tous les paramètres du trafic sont pris en compte globalement ;
- les congestions non récurrentes (incident ou accident) sont prises en compte immédiatement ;
- cette stratégie est intégralement automatique.

inconvénients:

- stratégie extrêmement complexe à calibrer et à mettre en oeuvre ;
- le nombre de paramètres à calibrer est considérable ;
- l'objectif de METALINE étant de rechercher un optimum global (collectif), la perception du gain par un usager particulier pourra être difficile.

A noter que cette stratégie, séduisante intellectuellement, est très complexe à mettre en oeuvre concrètement et surtout à exploiter. Peu de sites l'ont expérimentée et les résultats sont assez contradictoires : il semble que la gestion d'un axe par la régulation locale de ses accès via la stratégie ALINEA reste la plus efficace.

E. D'autres stratégies coordonnées

Dans ses travaux N. BHOURI¹⁸ a utilisé la modélisation du trafic pour le développement de deux stratégies coordonnées COMET et COSOP visant à minimiser le temps total passé dans le réseau par tous les véhicules sur l'autoroute et ses accès. Il semble que les résultats de COSOP ne soient pas satisfaisants.

Seule COMET est capable de bien gérer les situations de congestion et d'incidents.

¹⁸ N. BHOURI : Commande d'un système de trafic routier : application au boulevard périphérique de Paris. Thèse de l'université Paris Sud - 1991

Ces travaux préconisent l'utilisation conjointe et hiérarchisée de COMET et d'ALINEA : COMET, utilisant des prévisions de la demande, dispose de la connaissance de l'état du trafic sur la totalité de l'autoroute, alors qu'ALINEA est capable de s'adapter rapidement aux changements qui peuvent affecter les conditions de trafic.

V. LA MISE EN OEUVRE DE LA REGULATION PAR FEUX

Ce chapitre décrit un certain nombre d'éléments concrets nécessaires à la mise en place d'une régulation par feux, adaptative ou à feux fixes.

V.1. LE CALCUL DES CYCLES DE FEUX D'UNE STRATEGIE ADAPTATIVE

Le chapitre précédent décrit différentes stratégies adaptatives dont l'objectif est de calculer un débit autorisé sur un accès en fonction des mesures de trafic sur la voie rapide. Ce paragraphe précise la méthode pour traduire ce débit théorique en débit réellement écoulé par l'intermédiaire des feux, utilisable pour toutes les stratégies adaptatives décrites, exceptée la stratégie anglaise W&J.

On rappelle que le mot «durée de vert» est utilisé dans ce paragraphe dans un souci de clarté. il peut être impropre dans la pratique puisque c'est le jaune clignotant qui est imposé sur les feux de régulation des accès aux voies classées autoroutes, car les usagers qui empruntent une bretelle doivent céder le passage à ceux de l'autoroute : art. 26 du Code de la Route.

Un écoulement par peloton de véhicules

Dans le cas d'un écoulement du trafic de la rampe par peloton de véhicules, il est nécessaire de fixer la durée du cycle comme une constante de fonctionnement et de calculer la durée du vert en fonction du débit calculé par la stratégie.

Un écoulement véhicule par véhicule (peloton réduit à un seul véhicule) nécessite, au contraire, une conversion du débit calculé en durée de cycle, la durée de vert étant limitée au temps nécessaire au franchissement du feu par un seul véhicule. En effet en

écoulement au «goutte à goutte», un seul véhicule par cycle de feu étant admis sur la voie rapide, c'est la durée du cycle qui permet de gérer le débit.

Une durée de cycle optimale : 40 secondes

La durée d'un cycle de feu doit être fixée comme une constante locale à un accès. Cette durée de cycle détermine directement la taille des pelotons de véhicules qui vont s'insérer dans le trafic de la voie rapide : aussi les cycles plus courts seront plutôt utilisés sur des accès dont la configuration rend mal aisée l'insertion des véhicules entrants. L'INRETS préconise l'utilisation de cycles courts dans le cas de la régulation d'accès, la valeur optimale étant, semble-t-il, de 40 secondes.

A noter que la stratégie ALINEA s'appuie sur une loi de contrôle-commande qui agit sur le cycle de feux en effectuant la mesure du trafic de la voie rapide en aval de l'accès. Cette mesure est donc influencée par la commande effectuée au cycle précédent. Aussi pour obtenir un fonctionnement optimal de cette stratégie, il est souhaitable que la mesure soit effectuée pendant dans un temps égal à la durée du cycle et qu'elle soit mise à la disposition de la stratégie sans délai. De la sorte : la mesure réalisée durant le cycle k permet le calcul du débit appliqué au cycle $k+1$, la mesure effectuée au cycle $k+1$ permettant de «vérifier» les effets de cette commande.

A noter que les stratégies adaptatives utilisent couramment des données de trafic de type débit, taux d'occupation ou vitesse, élaborées sur la base d'une minute, la stratégie se servant d'une moyenne glissante de QTV 1 minute pour déterminer le débit de rampe.

Le débit entrant est fonction du débit calculé et de la durée de vert

Le débit de rampe calculé s'exprime en véhicules par cycle : il correspond, de fait, au nombre de véhicules en circulation pendant la phase de vert : c'est à dire que le débit calculé s'obtient par le réglage de la durée de vert suivant la relation suivante :

$$D_{Vert} = Q_r / Q_{sat}$$

avec :

$$D_{vert} = \text{durée de vert}$$

Q_r = débit de rampe calculé par la stratégie en véhicules par cycle

Q_{sat} = débit de saturation en véhicules par seconde, c'est à dire capacité d'écoulement de la rampe.

La stratégie calcule pour chaque cycle, une durée de vert (D_{vert}) compris entre une durée minimale (D_m) et la durée du cycle :

$$D_m < D_{vert} < D_c$$

La durée de vert minimale (D_m) correspond au débit minimal autorisé sur l'accès en cas de congestion sur l'axe (valeur à calibrer par accès).

La durée maximale (D_c) correspond à un vert permanent (pendant tout le cycle).

Mesure du débit de saturation

La capacité d'écoulement de la rampe est variable selon les conditions de circulation, une sous-estimation ou une surestimation du débit (Q_{sat}) introduit des erreurs non symétriques dans le calcul de la durée de vert (la relation est non linéaire). Aussi pour évaluer le débit (Q_{sat}), il est nécessaire de mettre en place une station de comptage sur la rampe pour dénombrer les véhicules entrants pendant une phase de vert. L'INRETS préconise l'utilisation d'une valeur moyenne du débit, lissée sur les quatre derniers cycles, ou à défaut, un débit moyen sur 3 minutes.

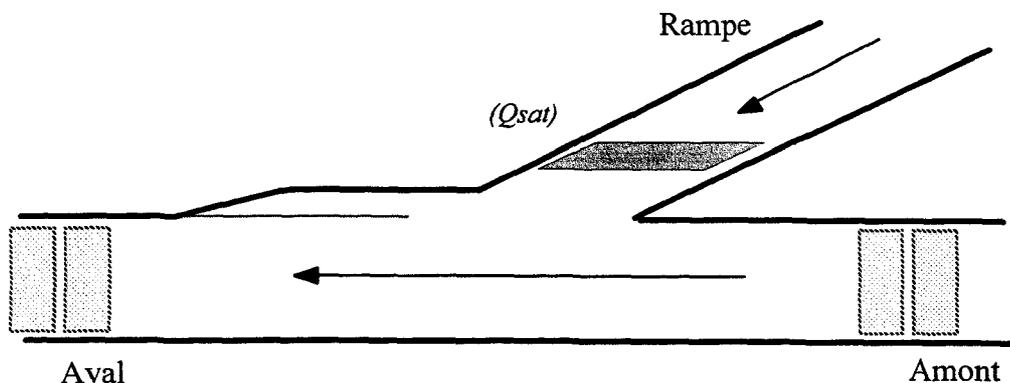


Fig. V.1. : Mise en oeuvre d'un écoulement par peloton

Une station de mesure inutile avec ALINEA

A noter que la stratégie ALINEA, fonctionnant en boucle fermée, intègre un terme autocorrecteur qui compense au cycle suivant une éventuelle erreur d'évaluation sur le débit (Q_{sat}). Il est donc inutile pour cette stratégie d'installer cette station de comptage sur la bretelle ; on fixe dans ce cas Q_{sat} comme une constante (0,5 véhicules par secondes par exemple)

V.2. LA GESTION DES FILES D'ATTENTE AUX ACCES

Détecter la file d'attente : souvent une nécessité

Aux abords des agglomérations, les rampes d'accès sont souvent situées à proximité de carrefours de surface. Lorsque ces rampes sont courtes, la remontée de la file d'attente générée par le contrôle d'accès peut provoquer le blocage du carrefour et générer des gênes importantes sur le réseau secondaire.

La prise en compte des remontées de file d'attente par un dispositif automatique est alors impérative.

Le principe de ce dispositif consiste à mesurer la longueur de la file d'attente à l'aide de capteurs placés sur la rampe et à adapter le plan de feu actif ou la stratégie active, en le rendant plus permissif dès que la queue atteint une certaine longueur.

Priorité d'un réseau sur l'autre : un choix d'exploitation à faire au cas par cas

Le mécanisme de détection de file d'attente a pour objectif d'éviter la saturation du réseau de surface ; il tend à s'opposer à la stratégie de régulation dont l'objectif est de maintenir la fluidité de l'autoroute. L'efficacité de chacun de ces dispositifs s'obtient au détriment de l'autre. Un tel système automatique permet le compromis, cependant c'est aux exploitants de la voie rapide et du réseau de surface de fixer accès par accès la stratégie à adopter.

Ce problème doit être réglé par les stratégies d'exploitation des réseaux routiers : la priorité donnée à la fluidité de la voie rapide ou du réseau secondaire est à définir accès par accès en fonction de considérations locales et peut nécessiter des aménagements de l'infrastructure routière.

Par exemple, en amont du Coen Tunnel d'Amsterdam, 3 accès sur 4 donnent la priorité au réseau secondaire, le quatrième accès, situé juste en amont du tunnel donne la priorité à la voie rapide.

La gestion des queues aux accès est assurée par un dispositif de détection de remontée de file d'attente associé à la stratégie de régulation, qui utilise des capteurs gérés localement. Un capteur de détection (B1) doit être installé à la limite supérieure de la rampe d'accès : il détermine la longueur maximale possible de la file d'attente. Des capteurs intermédiaires (Bi) peuvent compléter ce dispositif pour détecter la remontée des files d'attente à des niveaux intermédiaires.

Ces capteurs mesurent un taux d'occupation : au delà d'un certain seuil (par exemple 75 %), on considère que la queue remonte jusqu'à leur niveau. Ils doivent être gérés localement au niveau de l'accès car la détection de file doit générer une action immédiate prioritaire.

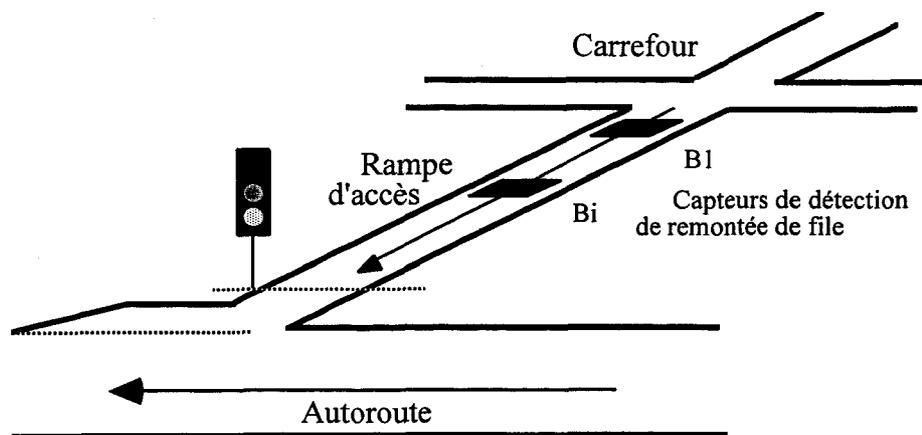


Fig. V.2. : Détection de remontée de file d'attente

Le dispositif de gestion de la file d'attente étant en place, son mode de fonctionnement peut varier ; il est fortement lié à la capacité de stockage (donc à la longueur) de la rampe et la priorité donnée par les exploitants entre voie rapide et réseau secondaire.

Priorité à la voie rapide

Fonctionnement sans détection de remontée de file d'attente :

La stratégie est appliquée sans la contrainte du carrefour de surface. Le calcul de la durée de vert est effectué normalement et l'on considère que la capacité de stockage est illimitée.

Priorité au réseau secondaire

Détection de remontée de file d'attente par un capteur terminal (B1) :

Dès que la file d'attente remonte au niveau supérieur de l'accès, détectée par le capteur (B1), la stratégie est débrayée automatiquement et le feu passe au vert tant que la contrainte subsiste. A noter que cette méthode, fort peu adaptative est «brutale» : elle minimise les effets de la stratégie de régulation mise en place et peut provoquer des perturbations sur l'autoroute.

Priorité au réseau secondaire avec adaptation progressive

Détection de remontée de file d'attente par un ou plusieurs capteurs intermédiaires (Bi) :

Les capteurs intermédiaires peuvent être utilisés uniquement en cas de panne du capteur principal et non pour changer le type de stratégie mise en place.

Les capteurs intermédiaires peuvent aussi être placés de telle sorte qu'il subsiste de la capacité de stockage en amont. Lorsqu'un capteur intermédiaire détecte une remontée de file d'attente à son niveau :

- soit la stratégie devient plus permissive par la modification d'une constante de fonctionnement (par exemple augmentation du vert minimum) ;
- soit la stratégie est remplacée momentanément par une autre stratégie plus permissive calibrée à cet effet (une stratégie feux fixes par exemple).

Lorsque l'on dispose d'une rampe d'accès suffisamment longue, on peut multiplier les capteurs intermédiaires en y adaptant différents plans de feux : cette méthode permet de maintenir les effets de la régulation tout en prenant en compte la remontée progressive de la file d'attente.

V.3. LA PRISE EN COMPTE DES ACCES A BRETelles MULTIPLES

A. Présentation du problème

Réguler à fois la demande sur la VRU et les flux entre bretelles

Certains accès sont composés de plusieurs bretelles convergentes. La régulation de ce type d'accès peut être réalisée de plusieurs manières :

- les feux de régulation sont situés à l'aval du convergent des bretelles (voir Fig. V.3. position 1 - P1 -), auquel cas la répartition des flux entrants se règle par le régime habituel des priorités ;
- les feux de régulation sont disposés sur chaque bretelle (voir Fig. V.3. position 2 - P2 -), auquel cas le dispositif prend en charge la gestion des flux de véhicules de chacune des bretelles et une

stratégie de gestion des flux entrants peut être associée à la stratégie de régulation globale de l'accès.

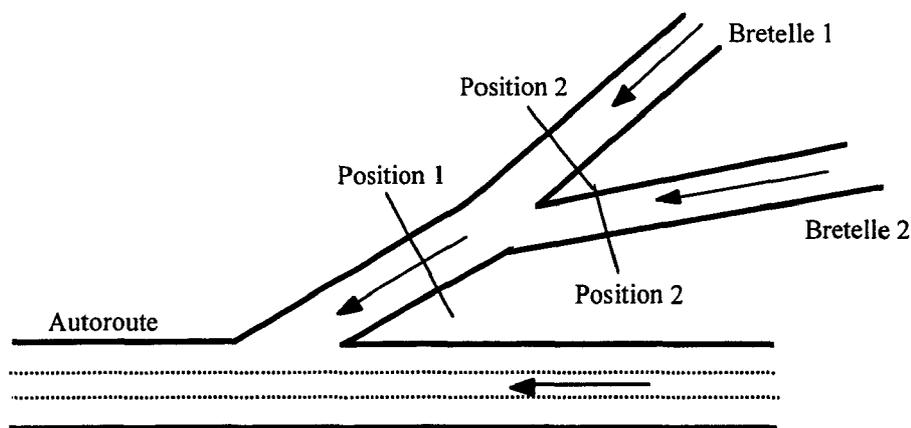


Fig.V.3. : Régulation d'un accès composé de plusieurs bretelles

La gestion des flux a pour objectif de répartir la provenance des flux de véhicules au niveau du convergent soit dans le but de faciliter les insertions, soit dans le but d'équilibrer des bretelles dont la demande n'est pas équivalente. A noter que les feux de régulation d'accès peuvent autoriser simultanément la circulation des véhicules de chaque bretelle, si le conflit est admissible (visibilité, vitesse, ...).

Dans le cas d'un accès régulé comportant plusieurs bretelles dont il faut gérer les flux, la démarche est la suivante :

- la stratégie de régulation calcule un débit entrant, donc un temps global de vert pour l'accès, à partir d'une durée de cycle fixée ;
- pour gérer les flux, cette durée de vert doit être répartie entre chaque accès en fonction des débits estimés sur chaque bretelle, le vert étant éventuellement décalé entre bretelles pour faciliter les insertions.

Le paramètre essentiel pour la régulation d'un tel accès est le temps de rouge commun à toutes les bretelles qui détermine le débit entrant sur la voie rapide.

B. Etude comparative des deux solutions

Des avantages et des inconvénients aux deux solutions

Pour les accès multiples, les deux solutions de localisation des feux sont possibles : soit P1 : en position 1 commune aux deux bretelles, soit P2 : en position 2 sur chacune des bretelles. Les deux solutions sont à examiner au cas par cas en tenant compte de la configuration des accès, des capacités de stockage, du risque d'une remontée de file d'attente sur le réseau urbain. Le but de ce paragraphe est d'examiner les avantages et les inconvénients des deux solutions.

Incidence sur le fonctionnement de la V.R.U.

Le choix de l'une ou l'autre position n'a aucune incidence sur le fonctionnement de la V.R.U.. Ce qui importe c'est que la V.R.U. reçoive le trafic injecté Qr. Il importe peu que ce trafic soit issu de l'une ou des deux bretelles.

Incidence sur les capacités de stockage

La solution P1 permet un stockage augmenté de la longueur du convergent, limité par le fait que la zone d'accélération en aval du feu respecte les exigences des normes ICTA V.R.U..

Incidence sur la sécurité

Le risque est à apprécier, en situation P2 lorsque les deux feux autorisent le passage simultanément sur les deux bretelles. En toute rigueur, la situation n'est pas différente de celle qui existe en l'absence de régulation. Cependant la présence d'une signalisation lumineuse peut donner à l'usager un sentiment de sécurité et induire une diminution de sa vigilance lors de l'insertion mutuelle des deux bretelles. Ce risque est réduit si :

- les deux flux sont admis avec un décalage auquel cas l'insertion se fera une fois les régimes établis ;
- les conditions de visibilité sont telles que la situation du convergent et de la bretelle antagoniste est connue de visu.

La solution, position 2, plus efficace pour gérer les flux

Incidence sur la gestion des flux

- Lorsque la demande sur les bretelles est sensiblement identique la position P1 a l'avantage de la simplicité.
- Lorsque l'une des bretelles est susceptible de saturer un carrefour de surface en amont, la position P2 permet de prendre en compte séparément la gestion des files d'attente moyennant l'installation de dispositifs de détection sur chacune des bretelles.
- Lorsque les demandes sur les deux bretelles sont sensiblement déséquilibrées, la solution P2 permet de rééquilibrer les files d'attente : ce qui se traduit par un gain sur le temps d'attente pour les usagers de la bretelle la plus chargée et sous certaines conditions, par un gain sur le temps global perdu.
- Lorsque les demandes sur les deux bretelles sont fortement déséquilibrées, la position P2 permet d'octroyer un temps d'insertion privilégié, nécessairement court, à la bretelle «minoritaire» et par ailleurs favoriser l'écoulement de la bretelle «majoritaire». Ceci peut conduire à une phase dans laquelle chacune des bretelles est admise seule.

V.4. LES EQUIPEMENTS DE TERRAIN ET LA SIGNALISATION UTILISABLES

A. Présentation

La régulation d'un accès à l'aide de feux nécessite la mise en place le long de chaque bretelle d'accès, d'équipements utiles au fonctionnement de la stratégie de régulation, à l'information des usagers et au respect des règles de sécurité.

Il s'agit de dispositifs :

- de signalisation,
- de présignalisation,

- de prescription,
- de détection,
- d'information.

Les panneaux de présignalisation et de prescription sont utilisés pour prévenir l'utilisateur de la présence d'un feu. La régulation d'accès ayant le plus souvent un fonctionnement intermittent dans la journée, il peut s'avérer nécessaire d'installer des panneaux dynamiques pour la signalisation ou la prescription qui soient visibles durant les périodes de régulation.

De même, un panneau à message informant clairement l'utilisateur que l'accès est en cours de régulation peut s'avérer utile.

On peut noter que lorsqu'un accès comporte plusieurs bretelles, chacune d'entre elles doit être équipée de présignalisation, de prescription et de détection même lorsqu'un seul feu régule l'accès.

B. Equipements de signalisation

Des feux bicolores pour réguler les accès

En matière de contrôle d'accès par peloton, la réglementation impose l'utilisation de feux tricolores de type R22 identiques au signal d'intersection R11. (La signalisation routière - Livre 1 - Article 111.1). Le signal R22 ne modifie pas les règles de priorité réglant l'accès à la voie rapide. Lorsque l'accès n'est pas prioritaire (accès à une autoroute), ce signal est obligatoirement de type R22j : jaune clignotant à la place du vert.

L'utilisation d'un feu bicolore de type R23 ou R23j, utilisé notamment aux péages autoroutiers est évoqué par le même texte pour la régulation des accès au gouffre à gouffre (véhicule par véhicule) pour contrôler une seule file de circulation.

Qu'il soit bicolore ou tricolore, le signal est normalement implanté à droite du couloir de circulation qu'il contrôle (*signal principal*). Il peut être rappelé au dessus de la chaussée ou à gauche (*signaux de rappel*).

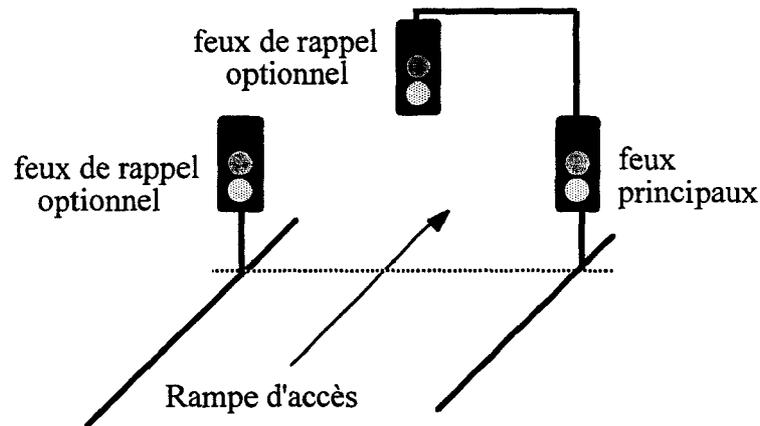


Fig. V.4. : Exemple d'implantation de feux tricolores de régulation d'accès

Une zone d'accélération ni trop courte, ni trop longue

L'implantation du feu doit être réalisée de telle sorte que la zone d'accélération à l'aval du feu soit de longueur suffisante pour que les véhicules entrants atteignent une vitesse suffisante au moment de leur insertion dans le flot de l'autoroute telle que définie dans les normes ICTA VRU.

Cependant l'expérience montre que si la zone d'accélération est trop longue, la vitesse acquise par les véhicules entrants peut être supérieure à la vitesse des véhicules sur la voie rapide et provoquer, de fait, une inversion des priorités pouvant générer des congestions sur la voie rapide. Ceci a pu être constaté sur l'autoroute A1 en Ile-de-France sur un accès comportant une voie d'accélération de plus de 300 mètres.

C. Equipements de présignalisation

Signaler la présence et l'activité des feux

La réglementation française impose la mise en place de panneaux de présignalisation de type A17 pour signaler la présence du signal tricolore hors agglomération.

Du fait du fonctionnement intermittent de la régulation d'accès, il est souhaitable que cette signalisation soit dynamique et qu'elle présente un signal utilisé uniquement en phase active. Il peut s'agir :

- d'un panneau fixe A17, équipé dans sa partie supérieure d'un feu jaune clignotant, qu'il est souhaitable de faire fonctionner lorsque la régulation est active,
- d'un panneau dont le signal n'est visible que lorsque le contrôle est actif (panneau à fibre optique, panneau à rideaux...).

En Ile-de-France les panneaux A17 complétés par des feux jaunes clignotants sont généralisés sur la plupart des accès ; en Hollande, un feu tricolore en fonctionnement jaune clignotant est utilisé en guise de présignalisation à l'entrée de la bretelle.

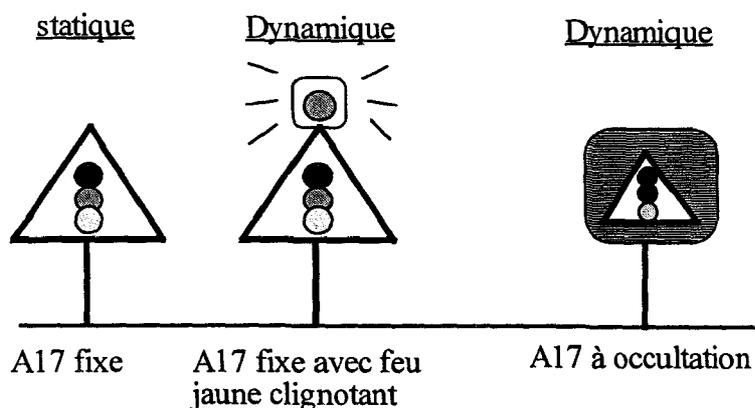


Fig. V.5. : Exemples de présignalisation utilisable

Le signal est normalement implanté à droite du couloir de circulation qu'il contrôle (*signal principal*). Il peut être rappelé à gauche de la chaussée (*signal de rappel*)

Le signal est situé entre 10 et 50 mètres du signal tricolore en agglomération. Hors agglomération, le signal est situé entre 50 et 150 mètres du signal tricolore. Un signal supplémentaire peut être installé au delà (300 à 400 mètres) lorsque la rampe d'accès est très longue.

Il est recommandé alors que les signaux dynamiques soient pourvus d'un système de détection de panne.

D. Equipements de prescription

Réduire la vitesse aux abords des feux

Il peut être nécessaire dans certains cas de prendre des mesures de restriction de vitesse à l'amont d'un feu et ainsi de disposer des panneaux de limitation de vitesse de type B14.

Sur certaines bretelles d'accès aux autoroutes où la vitesse des usagers est particulièrement élevée, il peut s'avérer nécessaire de disposer des signaux de prescription de limitation de vitesse dynamiques afin de ralentir le flot des véhicules arrivant au niveau des feux lorsqu'ils sont en fonctionnement.

Ce signal est un panneau (P.M.V.) dont le message est visible quand le contrôle est actif (panneau à fibre optique, panneau à rideaux...).

Le signal est en principe implanté à droite du couloir de circulation qu'il contrôle.

Par souci de sécurité, il est nécessaire que ce signal dynamique soit doté d'un traitement particulier de détection et de traitement des pannes : lorsque ce signal est en panne, la régulation de l'accès doit être désactivée immédiatement pour éviter les accidents en queue de file d'attente.

A titre d'exemple, l'accès de la nationale 37 sur l'autoroute A6 en Ile-de-France est équipé d'un tel dispositif. La nationale 37 est une route à quatre voies avec terre-plein central (en provenance de Fontainebleau) qui converge directement sur l'autoroute A6.

E. Equipements de détection

Des équipements pour contrôler la file d'attente

Les équipements de détection sont des capteurs (boucles électromagnétiques noyées dans le revêtement de la chaussée, ou des caméras mesurant la file d'attente). Ils sont destinés à détecter la remontée de la file d'attente au feu. A noter qu'il existe désormais des caméras équipées associées à des outils de reconnaissance d'image qui permettent de mesurer directement les longueurs de file d'attente.

Ces capteurs sont placés à deux types de position :

- la position terminale,
- éventuellement une à deux positions intermédiaires.

La position terminale, en amont du feu sur la rampe d'accès, détermine la longueur *maximale* de la file d'attente au feu. Il s'agit d'un dispositif de sécurité qui évite que la file d'attente au feu s'allonge au delà de cette position. Une détection de remontée de file jusqu'à ce niveau provoque un traitement local de commande des feux au jaune clignotant.

Lorsque la rampe d'accès est suffisamment longue (et que la stratégie de régulation mise en oeuvre le permet), le ou les capteurs intermédiaires sont disposés à distance intermédiaire entre le feu et le capteur terminal. Ces positions sont destinées à informer de la longueur de la file d'attente et ne provoquent aucun traitement local.

La détection de remontée de file par les capteurs est gérée localement par le dispositif de contrôle.

Lorsqu'un seul feu régule un accès comportant plusieurs bretelles, il est nécessaire d'équiper chacune des bretelles de capteurs de détection de remontée de file d'attente.

F. Equipements pour l'information des usagers

Informers les usagers sur l'état de l'accès

Il peut être nécessaire de diffuser de l'information aux usagers sur l'état de l'accès. Des panneaux à messages variables peuvent être disposés en amont de l'accès aux niveaux des points de choix pour permettre à certains usagers de modifier leur itinéraire. Dans le cas de plusieurs exploitants, il y aura alors nécessité d'un accord d'usage.

Ces panneaux peuvent être des PMV télécommandés ou simplement des panneaux à messages préprogrammés (accès régulé, accès fermé,...) activés localement par la mise en route de la régulation.

V.5. LE CONTROLEUR D'ACCES

A. Caractéristiques fonctionnelles d'un contrôleur d'accès

Un organe pour la commande locale de la régulation

L'objectif de ce paragraphe est de préciser les caractéristiques fonctionnelles d'un contrôleur d'accès nécessaires et suffisantes pour assurer la fonction de régulation, le pilotage et le contrôle des équipements cités précédemment.

objectifs de l'équipement

Cet équipement de contrôle a pour objectifs principaux :

- la régulation d'accès,
- la gestion de flux des accès à bretelles multiples.

Il pourrait avoir pour objectif secondaire la diffusion de son état (en service, éteint) à des équipements locaux : panneaux d'information pour informer que l'accès est régulé, contrôleurs des carrefours situés en amont des rampes d'accès ayant à prendre en compte l'état de l'accès dans leur plan de feux,...

Caractéristiques fonctionnelles générales

Le dispositif de régulation est un équipement modulaire, adaptable aux différentes configurations des bretelles d'accès.

Il a un fonctionnement essentiellement *intermittent*. Les accès qu'il régule disposent donc de règles de priorité associées à une signalisation fixe.

Le fonctionnement local de l'équipement : allumage, extinction, changement de cycle de feux,... peut être :

- soit piloté localement par une horloge,
- soit lancé par un opérateur,
- soit consécutif à la réception d'une commande émise par un système informatique distant chargé de gérer la stratégie de régulation.

L'équipement peut être télésurveillé et rendre compte de son état de fonctionnement à un système informatique distant.

Equipements de terrains gérés

Le contrôleur d'accès doit pouvoir gérer :

- une ou plusieurs lignes de feux,
- les panneaux de présignalisation dynamiques s'ils existent,
- les panneaux de prescription dynamiques s'ils existent,
- les capteurs de gestion de files d'attente,
- des équipements externes pour diffusion de son état.

Les signaux de présignalisation et de prescription (signaux A17 et signaux B14) sont allumés tant que le contrôleur est en service. Ils sont éteints sinon (y compris quand le contrôleur est en panne)

Les signaux électriques émis pour assurer la synchronisation avec des équipements externes de régulation sont actifs tant que le contrôleur est en service. Il sont inactifs dans tous les autres cas.

Le contrôleur assure l'alternance des deux ou trois couleurs (jaune clignotant, jaune fixe, rouge) en sachant que :

- la durée minimale de la phase de jaune clignotant ne peut pas être *inférieure à 6 secondes*,
- la phase de jaune fixe doit durer *5 secondes* ,
- pour un cycle, la durée maximale de la phase de rouge ne peut pas être *supérieure à 120 secondes*. (La signalisation routière - Livre 1 - Article 110.C.1).

Chacun des feux d'un accès constitué de plusieurs bretelles fonctionne indépendamment des feux des autres bretelles gérés par le même équipement. Néanmoins la durée du cycle est commune à tous les feux d'un accès.

La commande des cycles d'un accès consiste à fixer les valeurs suivantes :

durée du cycle :	commune à toutes les bretelles,
durée du Jaune clignotant	bretelle 1,
décalage	bretelle 1,
durée du Jaune clignotant	bretelle 2,
décalage	bretelle 2,
idem....	bretelle N.

Le *décalage* est défini comme l'intervalle de temps entre le début de cycle et le début de la phase de Jaune clignotant. Cette variable permet de caler les feux de plusieurs bretelles les uns par rapport aux autres et ainsi autoriser les flux simultanés, alternés ou décalés en provenance de plusieurs bretelles.

Dans l'exemple ci-dessous la commande fixe les paramètres suivants :

Cycle, Jaune Clignotant 1, Décalage 1 (= 0), Jaune Clignotant 2, Décalage 2

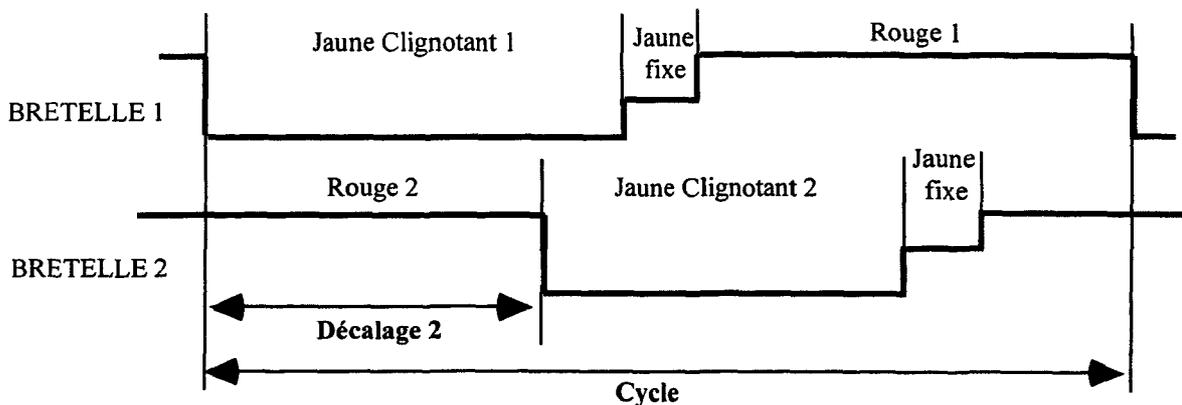


Fig. V.6. : Exemple de commande du cycle de deux bretelles.

Fonctionnement

Un contrôleur d'accès possède 3 séquences de fonctionnement :

- la séquence d'initialisation :
c'est la séquence de fonctionnement d'un contrôleur qui, initialement éteint, reçoit une commande (télécommandée ou par horloge locale) ayant pour effet d'activer la régulation. Elle provoque l'allumage de tous les signaux de présignalisation et de prescription concernant toutes les bretelles d'un accès et assure l'allumage d'un Jaune Clignotant Général durant un certain temps. L'objectif de cette séquence est avant tout sécuritaire : le temps de Jaune Clignotant Général est fixé de telle sorte qu'un véhicule entrant sur la rampe, alors que toute signalisation est éteinte, soit informé de la mise en oeuvre imminente d'une régulation d'accès. Cette durée est fonction de la longueur de la rampe mais devrait être supérieure à *une minute*.
- La séquence de contrôle :
c'est la séquence durant laquelle le contrôleur met en oeuvre les cycles de feux de chaque bretelle, cycles dont les caractéristiques sont programmées dans le plan de feu ou précisées dans la dernière commande reçue.
- La séquence d'extinction :
elle provoque l'extinction de tous les signaux concernant la signalisation, la présignalisation et la prescription et est consécutive à la réception d'une commande d'extinction (programmée ou télécommandée) ou à la détection de

certaines défauts. Cette séquence se caractérise par une phase de Jaune Clignotant Général dont la durée ne peut être inférieure à 2 *minutes*.

Fonctions télécommandées

Les fonctions nécessaires et suffisantes d'un contrôleur télécommandé à partir d'un système informatique central, sont les suivantes :

- La fonction de configuration du fonctionnement : elle permet de fixer les paramètres de fonctionnement généraux et de fonctionnement de chaque bretelle (durée de Jaune Clignotant d'initialisation, seuil de taux d'occupation pour la détection de File d'attente,...)
- La fonction de changement de cycle : elle permet de modifier le cycle actif (Jaune Clignotant, Jaune Fixe, Rouge) instantanément lorsque le contrôleur est en service
- La fonction de changement de phase : permet de fixer directement la phase d'un feu en dehors de tout contrôle réglementaire. Il s'agit d'une commande particulière à l'usage d'un exploitant pour gérer un accès dans des situations exceptionnelles (mise en place d'un rouge permanent pour interdire l'accès en cas d'accident grave ou de coupure de l'autoroute).
- La fonction d'extinction : provoque l'entrée immédiate dans la séquence d'extinction du contrôleur en service quelle que soit la séquence active du contrôleur (initialisation, contrôle, extinction).

B. Utilisation d'un contrôleur de carrefour

Un automate fonctionnellement très riche

Un contrôleur est un automate programmable qui active cycliquement les lampes des feux de signalisation en fonction de critères programmés, de contraintes de sécurité et d'événements externes ou internes. Il dispose d'un certain nombre d'entrées-sorties :

- les sorties, lignes de feux, permettant l'alimentation en 220 Volts d'un feu tricolore ou bicolore,

- les sorties banalisées, sorties programmables en très basse tension, qui permettent de renvoyer des informations d'état directement à un P.C. et à un autre contrôleur ou de piloter des dispositifs externes,
- des entrées très basse tension banalisées, disponibles pour recevoir des événements externes : en particulier entrées capteurs sur lesquelles des traitements de détection de seuils de taux d'occupation, et de débit peuvent être programmées,
- des entrées via des liaisons série permettant la télécommande.

Des adaptations nécessaires pour la régulation d'accès

Aussi lorsque l'on veut réguler un *accès isolé* à l'aide d'une *stratégie à base de cycles fixes*, on peut utiliser un contrôleur de carrefour du marché qui dispose de toutes les facilités pour piloter les équipements et assurer les fonctions décrites plus haut.

Cependant les contrôleurs de carrefour ne permettent pas d'assurer la *régulation isolé* d'un accès avec une *stratégie adaptative* puisqu'il n'intègrent pas ces stratégies.

En tant qu'équipements de terrain *asservis à un Système d'Aide à la Gestion du Trafic* intégrant une fonction de régulation d'accès, les contrôleurs de carrefour ne sont pas utilisables en l'état, même si l'on admet que c'est le système informatique qui, disposant d'une fonction de connaissance du trafic, mette en oeuvre les stratégies adaptatives et télécommande les cycles aux contrôleurs. Ceux-ci sont des équipements très autonomes et fonctionnellement très riches dont la finalité est différente et avant tout sécuritaire.

On peut penser que des contrôleurs d'accès spécialisés pourront être aisément dérivés des contrôleurs de carrefour actuels : leur structure matérielle semble suffisante, un ensemble de fonctionnalités de base est utilisable, seul la logique de commande est à modifier.

De plus, on peut penser qu'avec le protocole DIASER, récemment normalisé, on possède désormais la capacité à communiquer par un langage de commande et un protocole de communication via une liaison série.

C. La sécurité des contrôleurs d'accès

a) Les normes en matière de contrôleurs de carrefour à feux

Les normes éditées par l'association française de normalisation (AFNOR) sont au nombre de trois :

- la norme NF P 99-1001¹⁹ : décrit les caractéristiques des sécurités fonctionnelles d'usage des contrôleurs de carrefour à feux ;
- la norme NF P 99-105 : décrit les caractéristiques fonctionnelles des contrôleurs de carrefour à feux ;
- la norme NF P 99-110 : décrit les échanges de données par liaison fil à fil des contrôleurs de carrefour à feux avec les organes externes; les caractéristiques fonctionnelles et la définition des connexions.

Une application très partielle à la régulation d'accès

La norme de sécurité des carrefours à feux NF P 99-100 a été élaborée explicitement pour la gestion des intersections et *ne font pas mention des accès autoroutiers*. De fait, l'essentiel de cette norme n'est pas applicable à la régulation d'accès.

Ces normes ne traitent pas de la régulation d'accès mais, il est conseillé de s'y référer en ce qui concerne les seules règles de sécurité décrites dans la norme NF P 99-100, transposables à la régulation d'accès : *le contrôle de conformité*.

b) La norme NF P 99-100 : sécurités fonctionnelles d'usage

Principes des sécurités

• ¹⁹ Un projet de norme européenne sur la sécurité fonctionnelle des contrôleurs est en cours d'enquête (début 1997)

Cette norme décrit les spécifications minimales d'un contrôleur de carrefour en matière de sécurité pour les usagers, cette sécurité consistant à empêcher la présentation de messages lumineux erronés sur les signaux d'intersection susceptibles de mettre les usagers en danger.

Le principe des sécurités s'appuie sur :

- le contrôle des sorties (contrôle de conformité),
- le contrôle de la logique (sécurité intrinsèque),
- le contrôle des entrées,
- et le diagnostic des défauts.

les défauts sont réparties en deux classes :

- les défauts mineurs pour lesquels on maintient le déroulement des couleurs sur les signaux. Limités à 9 au maximum simultanément, ces défauts disparaissent lorsque la cause disparaît.
- Les défauts majeurs pour lesquels la sécurité des usagers n'est plus assurée et qui font basculer obligatoirement le carrefour au Jaune Clignotant de Sécurité.

Le Jaune Clignotant de Sécurité est un mode de fonctionnement qui suspend tout cycle normal des feux. Ainsi toute commande doit être ignorée, mais les liaisons, le dialogue de maintenance doit continuer à fonctionner. Le Jaune clignotant de Sécurité doit être généré indépendamment des organes logiques du contrôleur.

Les aspects transposables à la régulation d'accès

Le contrôle de conformité

Les contrôles de conformité sont destinés à vérifier que l'état des feux est conforme à la commande et qu'une seule couleur par ligne de feu est allumée à un instant donné.

La conformité est contrôlée en courant sur le rouge principal (ou contrôlé), en tension ou en courant sur le rouge secondaire (feu de rappel), en tension sur le vert et le jaune.

L'absence de vert, de jaune ou de rouge secondaire est considéré au bout d'une seconde, comme un défaut mineur ; tout autre défaut est majeur.

V.7. ELEMENTS D'ARCHITECTURE DES SYSTEMES

Plusieurs architectures sont possibles, pour mettre en oeuvre la fonction de régulation d'accès. On peut sommairement les regrouper selon les catégories suivantes :

- le système local isolé,
- le dispositif régional centralisé,
- le système régional décentralisé.

Bien entendu, il existe un grand nombre de variantes entre ces types d'architecture, qui dépendent des objectifs assignés au système et des contraintes techniques de chacun des sites.

A. Un système local isolé

Un dispositif utilisant un contrôleur de carrefour

Le système local isolé est un dispositif assurant le pilotage des feux, la commande de la signalisation dynamique associée et assurant le recueil nécessaire à la gestion de la stratégie et à la gestion de la file d'attente. S'il applique une stratégie à base de cycle fixe, il peut être organisé autour d'un contrôleur de carrefour qui, nous l'avons vu possède les entrées sorties nécessaires pour assurer ces fonctions.

Pour la mise en oeuvre d'une stratégie adaptative, ce système devra être dérivé d'un contrôleur de carrefour et adapté sur mesure.

Un tel système est fondamentalement destiné aux accès isolés, bien que l'on puisse imaginer aisément un lien de synchronisation entre deux ou trois de ces dispositifs.

Cependant, il est assez peu évolutif : la modification de la stratégie ne peut pas constituer une action d'exploitation courante puisqu'elle nécessite la modification du logiciel du contrôleur.

De même, l'adaptabilité aux conditions de trafic régionales n'est pas une opération aisée : cela nécessite la télécommande de nouveaux paramètres de fonctionnement à partir d'un système distant qui assure la supervision du trafic et la coordination.

B. Un système régional centralisé

Une architecture basée sur un système de gestion du trafic

Ce principe d'architecture suppose que la régulation du trafic est l'une des fonctions d'un système d'aide à la gestion du trafic d'un réseau de voies rapides. On suppose que ce système dispose d'une fonction de connaissance du trafic sur l'ensemble du réseau via un recueil de données automatisé. Les algorithmes de régulation sont localisés dans le système : ils calculent les temps de cycle des feux en fonction des données de trafic et télécommandent les nouvelles valeurs de cycles aux contrôleurs d'accès.

Dans ce type de système, le contrôleur d'accès est un dispositif asservi au système central. Ses fonctionnalités sont pauvres et son autonomie est limitée : il exécute la dernière consigne reçue (la valeur du cycle) jusqu'à réception d'une nouvelle.

Le traitement des remontées de file d'attente est une fonction locale qui lorsqu'elle est activée, est prioritaire sur la consigne de régulation.

Cet équipement doit être télécommandé et télésurveillé par un langage de commande par le PC central, au même titre que les autres équipements dynamiques de la V.R.U.

Cette architecture nécessite cependant des données assez fines (1minute au moins) et disponibles immédiatement pour la stratégie de régulation. De même, il est nécessaire que les délais de transmission et de commande des contrôleurs soient les plus courts possibles.

L'avantage d'une telle architecture est qu'elle s'intègre parfaitement aux systèmes de gestion de trafic existants en France. Elle est évolutive et permet aisément les changements de stratégie de régulation et la coordination entre accès, sans aucun impact sur la structure des contrôleurs sur le terrain.

L'inconvénient majeur réside dans le fait qu'il n'existe pas encore à ce jour de contrôleur d'accès «catalogue» répondant à ces spécifications bien qu'ils pourraient être aisément dérivés des contrôleurs de carrefour actuels.

C. Un système régional décentralisé

Un système de commande modulaire

Certains systèmes de gestion de trafic sont organisés en unités locales de gestion, supervisées par un système central de commande et de supervision. Il s'agit en particulier de systèmes hollandais et allemands (c'est le cas d'Amsterdam décrit plus loin).

Ces unités de gestion locale assurent la supervision du trafic sur une section de l'autoroute et la commande des équipements dynamiques (PMV, contrôleurs d'accès, ...).

Ces équipements ont un fonctionnement autonome : ils assurent toutes les fonctions nécessaires de supervision, d'analyse, de calcul et de commande des équipements dynamiques et peuvent être forcés ou synchronisés par une commande en provenance du système central.

L'avantage d'une telle architecture réside dans sa modularité : la panne d'un organe de commande n'affecte qu'une portion du réseau.

L'inconvénient de cette architecture réside dans le fait que les unités locales de gestion sont des dispositifs complexes, réalisées sur mesure (donc chers). de plus, la répartition de l'intelligence augmente la complexité globale du système et n'en favorise pas la maintenance.

VI. DES SOLUTIONS OPERATIONNELLES

VI.1. UNE REGULATION PAR BARRIERE : L'AFFECTATION DE TRAFIC A LA PORTE DE ST CLOUD.

A. Contexte

Un outil de régulation quasi-statique

La sortie Porte de St-Cloud du boulevard périphérique est fermée avant chaque fin de match au Parc des Princes, afin de permettre au flux des spectateurs sortants du Parc de traverser la bretelle de sortie sans risque.

Un dispositif mobile télécommandé à été installé à la demande de la police pour rendre la bretelle étanche à tout type de véhicule, ce dispositif devant être actionné à distance pour éviter tout incident avec les spectateurs.

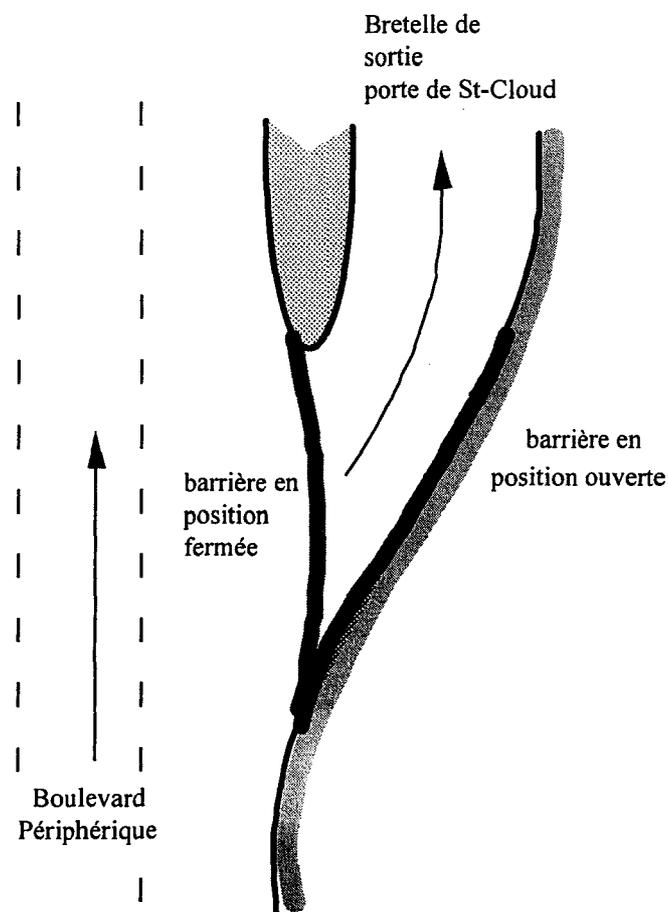


Fig. VI.1. : Disposition pour l'affectation de trafic

B. Description

Cette barrière, d'une longueur de 30 mètres, est constituée d'un ensemble rigidifié de blocs plastiques individuels montés sur galets et motorisé par deux moteurs. Les blocs se soulèvent sur les galets pour autoriser le déplacement de l'ensemble. Le mouvement est télécommandé à partir d'un boîtier à deux positions situé dans une armoire technique située à proximité.

C. Sécurité

5 feux de balisage et d'alerte, installés sur la barrière, s'allument automatiquement dès que la barrière quitte l'une de ses deux position de repos.

La barrière est autosuffisante d'un point de vue réglementaire : elle est totalement équipée sur toute sa longueur de panneaux K8 (flèches de rabattement).

Les feux de balisage sont alimentés en basse tension (12 Volts) et aucun courant fort ne circule sur la barrière.

Des dispositifs de levage manuel sont disponibles en cas de coupure de courant.

D. Signalisation

La fermeture de l'accès est signalé par un message sur les deux P.M.V. amont et deux panneaux B21 mobiles (flèches de rabattement à gauche) sont disposés en amont de la barrière fermée.

E. Conclusion

Il s'agit d'un dispositif expérimental dont la Ville de Paris souhaite étendre l'utilisation à la fermeture de plusieurs autres accès (Porte de la Plaine et accès A6).

VI.2. UNE REGULATION PAR BARRIERES AUTOMATIQUES : LE CAS DE LYON

A. Le site

Plusieurs sites de régulation d'accès ont été mis en place sur l'axe A6-A7 de l'agglomération lyonnaise. Dans ce paragraphe, seuls sont abordés les sites dont le rôle est de réguler le trafic et non les sites de coupure totale du trafic sur A7 dans le cadre de la prévention des incidents au niveau du couloir de la chimie.

Les sites existants sont les bretelles d'accès au Tunnel de Fourvière, localisées sur cette carte.

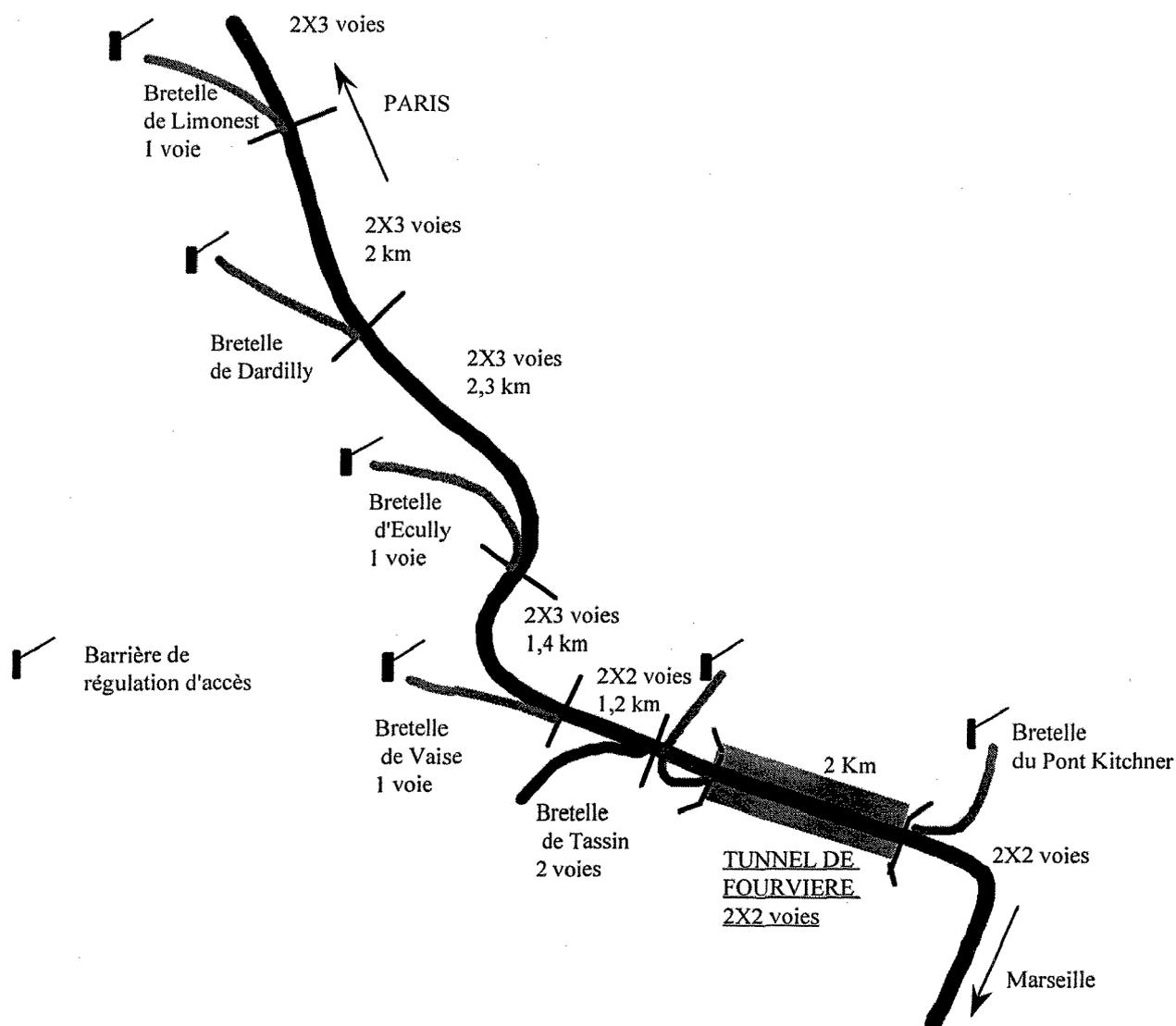


Fig. VI.1. : Implantation des barrières sur le réseau lyonnais

L'accès au tunnel de Fourvière depuis le réseau urbain du Nord Ouest Lyonnais est régulé par 5 sites de régulation d'accès. Seule la bretelle de Tassin n'est pas équipée bien qu'un trafic important s'y écoule aux heures de pointes journalières.

L'accès au Tunnel de Fourvière depuis le Sud n'est contrôlé que sur la bretelle du Pont Kitchner.

Les bretelles de Gorge de Loup et du Pont Kitchner sont situées aux têtes du Tunnel et sont dépourvues de zone d'accélération, ce qui induit des problèmes d'insertion qui peuvent perturber fortement le fonctionnement du Tunnel.

B. Objectifs

Le principal objectif de la régulation d'accès est de diminuer la longueur des files d'attente au niveau du Tunnel sous Fourvière consécutives à un excès de demande, ou dues à un incident sur l'axe A6-A7.

C. Méthodes

La régulation est effectuée par des barrières automatiques pilotées depuis le P.C. CORALY. Le pilotage est effectué de manière manuelle, par l'intermédiaire d'un poste de contrôle qui centralise l'état des barrières et des informations de trafic.

La fermeture des bretelles est effectuée en fonction des longueurs de bouchons perçus par les opérateurs du P.C. via les caméras vidéo et des mesures de taux d'occupation. Les barrières peuvent être fermées indépendamment les unes des autres en fonction de la localisation de la perturbation et de sa gravité.

Aucune stratégie précise n'a été formulée. L'appréciation des bouchons et la durée de fermeture d'une bretelle dépend fortement de l'opérateur en service.

Les barrières de Gorge de Loup et du Pont Kitchner sont fermées régulièrement par période de 5 à 10 minutes pendant les heures de pointes de semaine, pour améliorer l'écoulement au niveau des têtes du Tunnel. Les autres barrières sont fermées lors de fortes perturbations sous le Tunnel dues à un incident ou lors de situations de trafic particulièrement chargées : trafic de transit élevé pendant une heure de pointe pour le trafic local (un vendredi de veille de vacances par exemple).

D. Equipements d'information et de sécurité

Chaque barrière est équipée d'un panneau de signalisation fixe de déviation, visible quand la barrière est fermée et deux feux de balisage et d'alerte. Un feu rouge clignotant est allumé pour prévenir de la fermeture imminente de la barrière.

Une boucle magnétique, installée sous la barrière détecte la présence des véhicules et interdit la fermeture de la barrière.

Un itinéraire de déviation fixe fléché en jaune, est mis en place de manière permanente pour guider les usagers lors des fermetures.

Un seul accès est équipé d'un PMV indiquant que l'accès est fermé. Il est situé à l'entrée de la bretelle du pont Kitchner.

E. Conséquences

Aucune évaluation précise n'a été menée pour évaluer quantitativement l'impact de la fermeture des bretelles tant sur le fonctionnement du réseau autoroutier que sur celui du réseau urbain. Le constat des opérateurs montre :

- que la fermeture des bretelles, notamment celle de Gorge de Loup et du Pont Kitchner a un effet positif rapide sur l'écoulement aux entrées du Tunnel,
- que la fermeture périodique de tout ou partie des bretelles permet de faire diminuer la longueur des bouchons et de contenir ceux-ci dans des limites acceptables par les usagers.

Le point faible du dispositif est l'absence de régulation d'accès sur la bretelle de Tassin située à 250 mètres de l'entrée du Tunnel et dont la zone d'accélération trop courte pose des problèmes d'insertion importants accentués par le trafic élevé de la bretelle.

L'impact sur le réseau urbain des fermetures des bretelles est mal connu, compte tenu de l'absence de postes de mesures permanents sur ce réseau. Cependant, on a pu constater, à partir des caméras de vidéo surveillance du réseau urbain, qu'il est bénéfique aux abords immédiats des accès : les congestions de l'autoroute ayant tendance à remonter le long de la bretelle et à bloquer les carrefours de surface aux alentours, lorsque l'accès est ouvert en situation de congestion.

Il n'y a pas de conflit majeur entre les municipalités et l'Etat (exploitant du Tunnel de Fourvière) sur les mesures de régulation d'accès. Cette tolérance est largement due à la

saturation permanente qui existe dans ce secteur aux heures de pointe depuis la mise en service du Tunnel.

Deux points ont été mis en évidence :

- la fermeture de la bretelle de Gorge de Loup s'accompagne d'un report de trafic sur la bretelle de Tassin et de transit par la Colline de Fourvière ;
- la fermeture de la bretelle du Pont Kitchner s'accompagne d'un report de trafic sur la montée de Choulans (qui permet d'accéder à la colline de Fourvière), engendrant une saturation importante qui pénalise fortement le bon fonctionnement des lignes de bus empruntant cet axe.

VI.3. UNE REGULATION ISOLEE PAR FEUX FIXES : LE CAS DU PONT DE NOGENT

A. Contexte

Depuis plus de dix ans, l'accès de l'autoroute A4 vers Paris au pont de Nogent est régulé par un système indépendant pilotant des feux tricolores. Ce dispositif a été mis en place car l'accès débouche juste au niveau du convergent des autoroutes A86 (en sortie de la section sous-fluviale) et A4 et que ce secteur est fortement congestionné lors des pointes du matin.

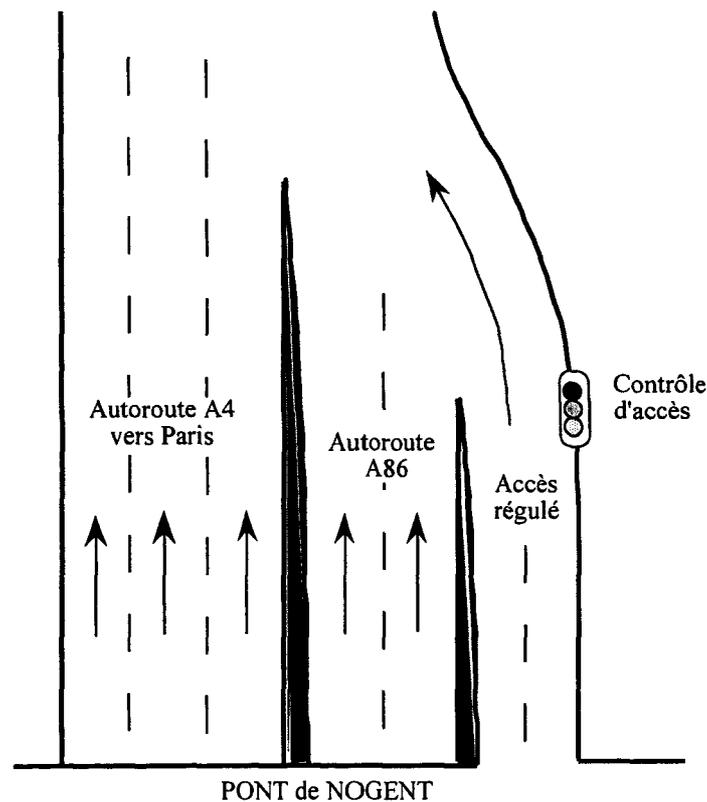


Fig. VI.3. : Implantation de la régulation d'accès au Pont de Nogent

B. Description

Le système est piloté par un contrôleur de carrefour, gérant localement les cycles de feux. La mise en route de la régulation est assurée par un commutateur manuel disposé à distance, en salle d'exploitation au P.C. des Ratraits. Ce commutateur est à trois positions : ARRET - MARCHE - ROUGE PERMANENT.

L'exploitant dispose par ailleurs d'outils d'exploitation du trafic pour superviser le fonctionnement du réseau à cet endroit :

- des caméras de surveillance,
- des stations de recueil du système SIRIUS mesurant : débit et taux d'occupation sur la bretelle, débit - taux d'occupation et vitesse sur A4 et sur A86.

La mise en route de la régulation est opérée par l'analyse du débit mesuré sur la bretelle lorsque l'exploitant constate que celui-ci dépasse un certain seuil. A l'usage, les

exploitants remarquent que le bouchon récurrent de ce secteur est retardé quand le dispositif est utilisé. La régulation fonctionne entre 7 heures et 9 Heures 30 le matin.

C. Signalisation

La signalisation est fixe : elle est constituée d'un signal A17 couplé à un signal B14 de limitation de vitesse à 60 Kilomètres à l'heure. Aucun dispositif particulier n'informe que l'accès est en cours de régulation.

VI.4. UN SYSTEME DE REGULATION D'ACCES : LE CAS DE L'ILE DE FRANCE

A. Présentation et objectifs

Le système de contrôle des accès, opérationnel en Ile-de-France, a été installé au début des années 1980 dans le cadre d'une opération visant à améliorer les conditions de trafic sur les voies rapides d'Ile-de-France, opération baptisée «les matins d'Ile-de-france».

Une quarantaine d'accès autoroutier des autoroutes A1, A3 et A6 ont été équipés de feux tricolores et d'une signalisation associée. Un système informatique centralisé dans chaque P.C. de circulation et un système de transmission permettent la mise en oeuvre d'une stratégie de régulation par plans de feux fixes préétablis et la télésurveillance des équipements du terrain.

Les plans de feux correspondant aux heures de pointe du matin et aux heures de retour de fin de semaine ainsi que des plans de feux correspondant à des situations de trafic exceptionnelles ont été élaborés pour chaque accès : ils sont mis en oeuvre automatiquement à partir des P.C.

Les plans de feux déterminent l'heure de déclenchement, la durée des cycles de feux et la durée de Jaune Clignotant par cycle pour chaque bretelle, de fait le débit des véhicules entrants.

B. Les équipements de terrain

Les équipements de terrain s'organisent autour d'un contrôleur conçu pour gérer un accès équipé d'une ou deux bretelles. La gestion des équipements de chaque bretelle est structurée par une artère de contrôle / commande constituée d'un câble de 30 paires, chacune des paires ayant une affectation bien définie de commande ou de compte-rendu.

Les équipements de terrain comprennent :

- les signaux de présignalisation, ensemble de panneaux dynamiques dont l'absence n'entraîne pas de traitement sécuritaire :
 - les signaux de danger (A17 clignotant),
 - les signaux de rappel de vitesse (B14 à diodes),
 - les panneaux d'information de feux tricolores signalant la présence des feux à 2000 m,
 - les panneaux d'indication de l'état de l'accès à trois états (neutre, accès régulé, accès fermé) ;
- les signaux de prescription dynamique (type B14) dont la panne entraîne un traitement sécuritaire ;
- les feux tricolores, propres à chaque bretelle d'un accès ;
- l'armoire énergie ;
- l'armoire de détection de file d'attente et sa boucle placée à l'amont du feu ;
- l'armoire de comptage des véhicules et sa boucle de comptage placée à l'aval du feu.

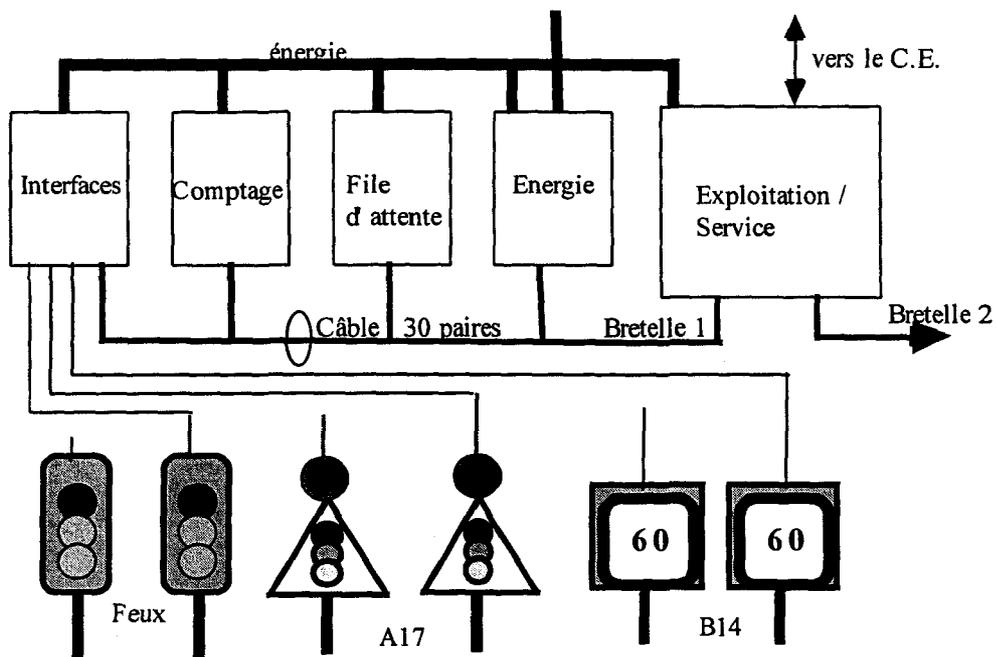


Fig. VI.4. : Principe de raccordement des équipements de terrain

Le contrôleur émet des commandes en direction des équipements de terrain, une commande pouvant activer plusieurs équipements du même type. Les équipements de terrain restituent au contrôleur des informations d'état, et l'armoire détecte les erreurs qui seront retransmises au centre d'exploitation.

Le contrôleur peut fonctionner selon deux modes :

- un mode local dans lequel les demandes de changement de cycle sont commandées par un exploitant à partir d'un pupitre de commande local,
- un mode C.E, automatique, dans lequel le fonctionnement est piloté à partir du Centre d'Exploitation distant.

C. Le système informatique central

Les contrôleurs d'accès sont télécommandés par un système informatique centralisé au CES, un micro-ordinateur de type «Exorciser» équipé d'une console opérateur et d'une imprimante.

La transmission des données est réalisée par l'intermédiaire d'une liaison série RS-232, raccordée via des modems V23 en multipoint à plusieurs équipements de terrain.

Ce système offre à un exploitant les fonctions suivantes :

- saisie, modification, interrogation des paramètres des accès,
- saisie, modification, interrogation des plans de feux de la bibliothèque,
- sélection et activation du plan de feux opérationnel,
- gestion du journal de bord des alarmes et événements,
- visualisation de l'état opérationnel des accès.

D. Le fonctionnement : la commande des feux

Le système informatique active deux types de commandes à destination des contrôleurs :

- une demande d'état du contrôleur,
- une commande de changement de cycle.

La demande de changement de cycle contient les paramètres suivants :

- durée du cycle,
- durée du jaune clignotant de la bretelle 1,
- et s'il y a lieu, durée du jaune clignotant de la bretelle 2.

Les durées de jaune clignotant des bretelles 1 et 2 sont précisées par le plan de feux, mais localement les phases des feux des deux bretelles d'un accès double sont déterminées pour fonctionner en opposition afin de minimiser le rouge commun. (les demi-phases opposées sont calées).

La commande des cycles permet les actions particulières suivantes :

- commande d'extinction,
- cycle infini en jaune clignotant,
- cycle infini au rouge.

La phase d'initialisation est déclenchée par une commande des cycles de feu vers les équipements de terrain alors que ceux-ci sont éteints. Cette étape provoque l'allumage de

toute la présignalisation et l'allumage des feux au jaune clignotant durant 2 minutes. Le nouveau cycle commandé est pris en compte à l'issue de cette étape. La détection de file d'attente est ignorée durant cette phase.

La phase d'extinction est provoquée par une commande spécifique. Cette commande a pour effet de mettre en place une phase de jaune clignotant sur les deux bretelles pendant 4 minutes, suivie d'une phase de rouge de 3 secondes. Toute détection de file d'attente durant cette phase reporte la phase totale (4 minutes) à la fin de la détection. Toute nouvelle commande de changement de cycle, émise durant cette phase, annule la phase d'extinction.

Les changements de cycle sont pris en compte au plus tôt par les équipements de terrain sur réception d'une commande particulière :

- si la phase en cours sur l'une des deux bretelles a atteint, au moins, la durée précisée par la nouvelle commande alors le nouveau cycle est pris en compte (il y a anticipation sur la phase en cours) ;
- si la phase en cours est le jaune fixe, la prise en compte est décalée jusqu'à la fin de cette phase ; aucune phase en cours ne peut durer moins de 5 secondes sur l'une des deux bretelles.

Le délai de transmission des commandes dépend de la qualité de la transmission et donc du nombre de répétition :

- sans erreur de transmission sur la liaison, le délai de transmission et de prise en compte des commandes est de 1,3 secondes .
- dans le cas extrême : (15 répétitions sur chaque station de la liaison) le délai de prise en compte des commandes est de 3,5 secondes.

E. La télécommande

La commande des équipements de terrain et la demande d'état sont réalisées par des messages d'échange transmis en binaire via un protocole équivalent à un mode de base simplifié (mode «question-réponse»).

Les commandes émises par le CES sont les suivantes :

- demande de changement d'état,
- demande d'état,
- commande de changement de cycle,
- commande de mise à l'heure.

La demande des changements d'état des stations est émise par le C.E. chaque 10 secondes vers toutes les stations. Sur des comptes rendus particuliers, le C.E. réémet à la fin du cycle d'interrogation une demande d'état vers chaque contrôleur présentant un changement d'état.

La commande de remise à l'heure est lancée chaque heure, sans acquittement des stations.

Les commandes de changement de cycle sont effectuées au moment du changement de cycle défini par le plan de feux actif ou après une rupture de liaison.

F. Conclusion

Ce dispositif est toujours opérationnel à ce jour, mais une partie du matériel est devenu obsolète et sera remplacé dans un avenir proche. Tel qu'il est conçu, ce système permet aisément la mise en oeuvre de stratégies adaptatives locales et d'une stratégie régionale coordonnée, moyennant le couplage du système informatique central avec le recueil de SIRIUS.

VI.5. UN SYSTEME DE REGULATION ADAPTATIVE : LE CAS D'AMSTERDAM

A. Présentation et objectifs

Aux Pays-Bas, l'autoroute A10 WEST contournant la ville d'Amsterdam a été équipée de dispositifs destinés à la mise en oeuvre de stratégies de régulation, adaptatives et coordonnées sur les 4 accès en amont du Coentunnel.

Ces dispositifs ont pour objectifs :

- le maintien d'un débit optimal sur la voie rapide notamment aux abords du tunnel en aval,

- la réduction des phénomènes «accordéon» dans le trafic de la voie rapide,
- l'amélioration de la sécurité des usagers,
- l'amélioration du processus d'insertion des véhicules entrants dans le flot des véhicules circulant sur la voie rapide.

Les caractéristiques essentielles du dispositif sont les suivantes :

- l'utilisation de quatre stratégies adaptatives :
 - deux locales à chaque accès : ALINEA et RWS,
 - et deux coordonnées METALINE et RWSCOR ;
- une mise en oeuvre des stratégies avec un écoulement au «goutte à goutte» ;
- une régulation voie par voie, avec sur certains accès, une voie prioritaire réservée aux autobus ;
- une architecture modulaire, organisée en stations locales de recueil et de régulation couplées à un dispositif central de supervision et de coordination.

Les postes locaux de régulation ont été réalisés «sur mesure» : ils intègrent à la fois les stations de recueil nécessaires à la mesure des conditions de trafic sur l'autoroute, situés sur l'autoroute à l'amont et à l'aval des accès et tous les équipements destinés à la régulation des rampes. Le coût global des quatre contrôleurs locaux s'élevait à 2 MF en 1993.

B. Méthode de régulation

Comme nous l'avons signalé plus haut, la méthode de régulation utilise quatre stratégies adaptatives : deux locales et deux coordonnées. Ces stratégies sont complétées par un écoulement des débits calculés au «goutte à goutte» contrôlé par un feu tricolore (Vert, Jaune, Rouge). La phase de jaune fixe est de durée variable, fixée par le franchissement par le dernier véhicule, de la ligne de feu .

Chaque voie de circulation de la bretelle est contrôlée par un feu indépendant, ce qui permet de doubler le débit entrant (400 véhicules par heure et par voie au maximum) pour des durées de cycle variant entre 7 et 12 secondes.

Certains accès disposent d'une voie spécialisée pour les autobus qui est équipée d'un feu bicolore et de capteurs de détection de présence. Lorsqu'un autobus est détecté sur la voie spécialisée, son signal passe au vert alors que les autres signaux de la bretelle sont bloqués au rouge jusqu'au franchissement de la ligne de feux par le bus.

La régulation s'appuie sur :

- des dispositifs locaux : les stations de régulation,
- un système de recueil global sur la voie rapide,
- un système centralisé de supervision et de coordination de la régulation.

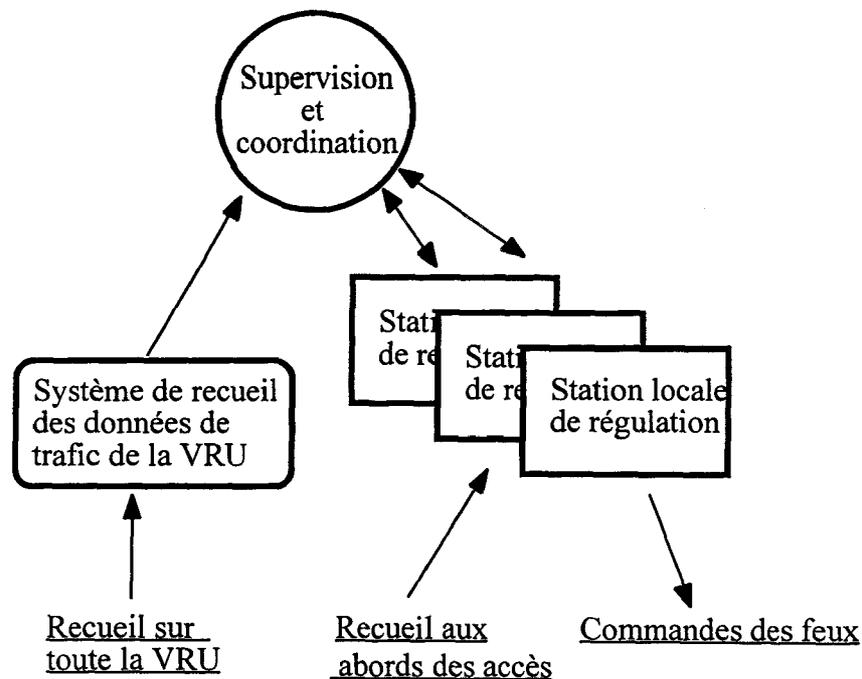


Fig. VI.5. : Dispositifs de contrôle et de régulation d'Amsterdam

La station de régulation, installée sur chaque accès régulé, assure localement :

- le recueil des mesures de trafic sur la voie rapide à l'amont et à l'aval de l'accès, la mesure est réalisée par des doubles boucles mesurant débit, taux d'occupation et vitesse (QTV 1 minute),

- le recueil sur les bretelles d'accès nécessaire au fonctionnement du goutte à goutte, à la détection de remontée de file d'attente, à la détection de présence de véhicule sur la bretelle et à la détection des autobus,
- la commande des feux tricolores de régulation au goutte à goutte,
- la commande de la présignalisation utilisant des feux tricolores situés à gauche et à droite des voies, à l'entrée de la bretelle d'accès et fonctionnant au jaune clignotant permanent,
- le calcul des stratégies et des durées de cycles,
- la supervision du fonctionnement local,
- la communication avec le P.C. et la transmission des paramètres de fonctionnement des stratégies, des alarmes équipements et événements, et la réception de consignes permettant de régler les stratégies de régulation coordonnées ou de forcer le fonctionnement local.

Le centre de supervision et de coordination supervise le fonctionnement des stations locales. Il agit sur les stations locales selon deux méthodes :

- lorsqu'une station décide de lancer la régulation (suite à la détection d'une vitesse moyenne sur la VRU à l'amont et à l'aval de l'accès inférieure à un seuil de vitesse), le centre de supervision peut forcer en régulation les stations des accès amont, chacune appliquant sa stratégie locale ;
- en coordination globale, le centre force tous les postes de régulation à l'utilisation d'une stratégie coordonnée (RSWCOR ou METALINE), le centre calcule et transmet périodiquement des facteurs de correction basés sur les variables de trafic recueillies sur l'ensemble de la VRU.

Par ailleurs un dispositif de recueil de données assure la supervision du trafic sur l'ensemble de l'autoroute et anime des panneaux de limitation de vitesse.

C. Techniques de communication

Le réseau des communications entre le centre de contrôle et les stations de régulation s'organise en liaisons point à point selon le schéma ci-après.

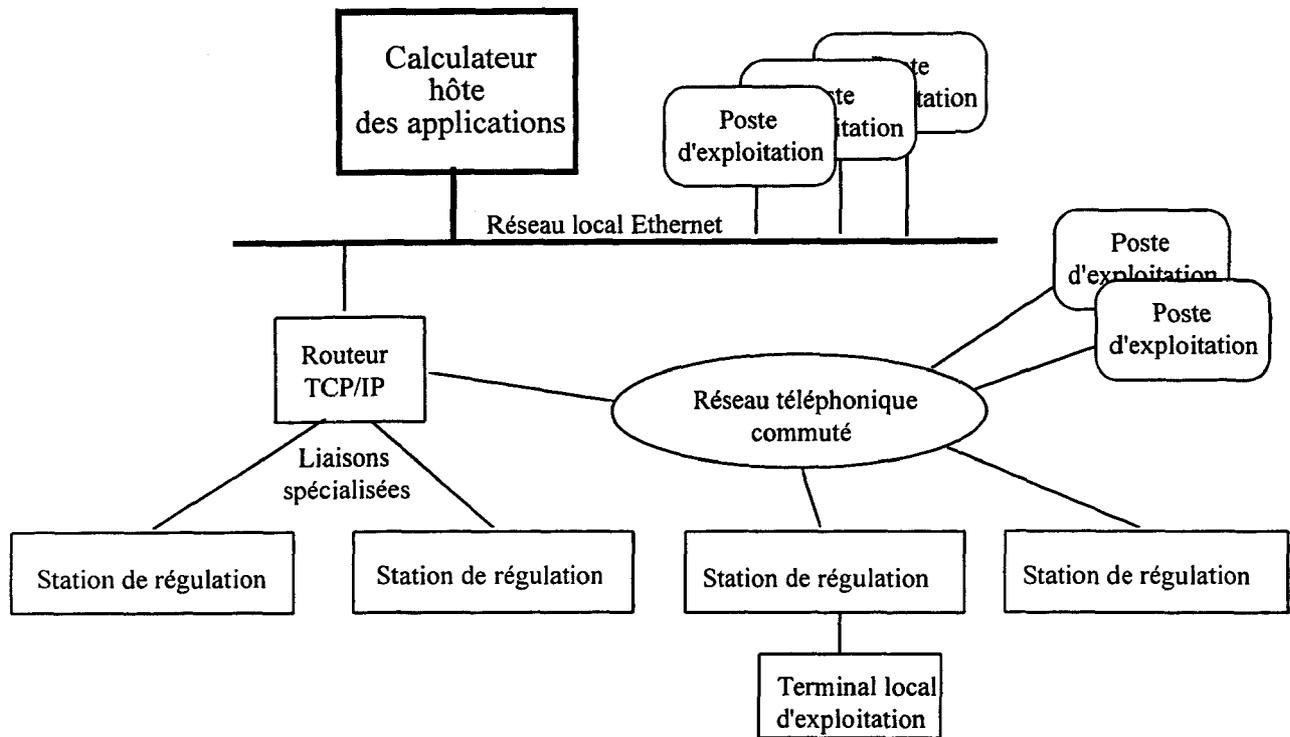


Fig. VI.6. : Organisation des liaisons dans le système d'AMSTERDAM

Le réseau utilise toute la pile des protocoles Ethernet selon une organisation représentée dans le schéma suivant.

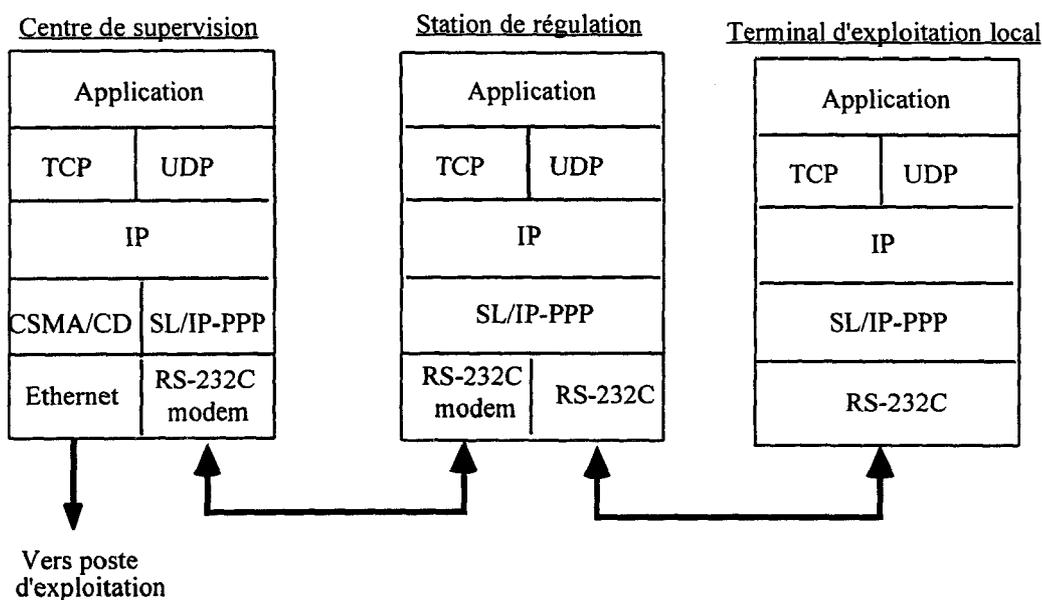


Fig. VI.7. : Pile des protocoles mise en oeuvre dans le système d'AMSTERDAM.

Le ordinateur du centre de supervision et de coordination communique avec les stations locales via le réseau Ethernet sous TCP/IP. Il communique avec les stations de régulation via le protocole TCP/IP sur LS ou à travers le réseau commuté avec modem (via SL/IP ou PPP). Les stations de régulation se connectent à des postes d'exploitation locaux avec les mêmes protocoles mais sans modem.

VI.6. UN AUTRE DISPOSITIF TECHNIQUE DE REGULATION ADAPTATIVE ENVISAGEABLE

A. Présentation et objectifs

Les informations contenues dans ce chapitre concernent un appel d'offre lancé par les Autoroutes du Sud de la France en décembre 1994 pour la mise en place d'un contrôle d'accès sur deux accès de l'autoroute A64, et quelques éléments techniques de la réponse du groupement retenu pour la réalisation. A ce jour la consultation pour la fourniture de systèmes de régulation d'accès a été revue : seul un dispositif automatique de fermetures des accès par des barrières a été installé. Cependant, les éléments techniques de cette consultation pour la mise en oeuvre de la stratégie adaptative ALINEA sont suffisamment intéressants pour être évoqués ici.

L'objectif du marché est d'installer un système de régulation sur deux accès de l'autoroute A64 visant à :

- limiter les risques d'accident,
- assurer un débit optimal d'écoulement,
- favoriser les trajets de moyenne et longue distance,
- permettre la fermeture temporaire d'une chaussée.

Le système comporte essentiellement :

- des dispositifs locaux de régulation des accès par feux tricolores activés selon une stratégie feux fixes et la stratégie adaptative ALINEA,
- des barrières automatiques de fermeture des accès,
- un système informatique central permettant d'assurer la supervision, la commande et le réglage du fonctionnement.

A noter qu'un système de recueil est opérationnel sur l'autoroute A64 : le système RDT MISTRAL, mais celui-ci ne permet pas de disposer d'informations de trafic plus fines que des QTV 1 minute au plus tôt une minute après leur élaboration.

B. Solution technique

La solution technique proposée consiste à mettre en place un système réparti en deux niveaux :

- une station de contrôle-commande locale au niveau de chaque accès,
- un système de commande et de supervision centralisé au P.C.

La station locale construite à base d'un automate programmable a pour fonctions :

- d'effectuer le recueil des données de trafic de l'autoroute nécessaires à la stratégie ALINEA : des données «débit et taux d'occupation» sont élaborées et transmises chaque 5 secondes au système de commande centralisé. A noter que le recueil s'appuie

sur les signaux prélevés en double à la sortie des détecteurs existants du système MISTRAL ;

- d'effectuer la commande immédiate des feux tricolores de l'accès à partir des consignes reçues en temps réel du P.C. précisant la durée de cycle et la durée de vert des feux de régulation ;
- d'assurer la télésurveillance des équipements et notamment des barrières.

Le système de commande centralisé au P.C. a pour fonction :

- d'assurer le calcul des cycles de feux par la stratégie ALINEA à partir des mesures 5 secondes reçues du terrain lissées sur 3 minutes ;
- de télécommander les cycles de feux en fonction des calculs de la stratégie au plus pour chaque cycle de feux,
- de superviser le fonctionnement,
- de permettre à un exploitant de régler les différents paramètres des stratégies ALINEA...

A noter que la mise à disposition de données 5 secondes permet de définir des durées de cycle multiple de 5 secondes et de disposer d'une mesure de trafic parfaitement synchrone sur la durée de cycle.

A noter que la communication entre le P.C. et les automates de terrain est réalisée via une liaison spécialisée avec modems en multipoint en utilisant un protocole MODBUS.

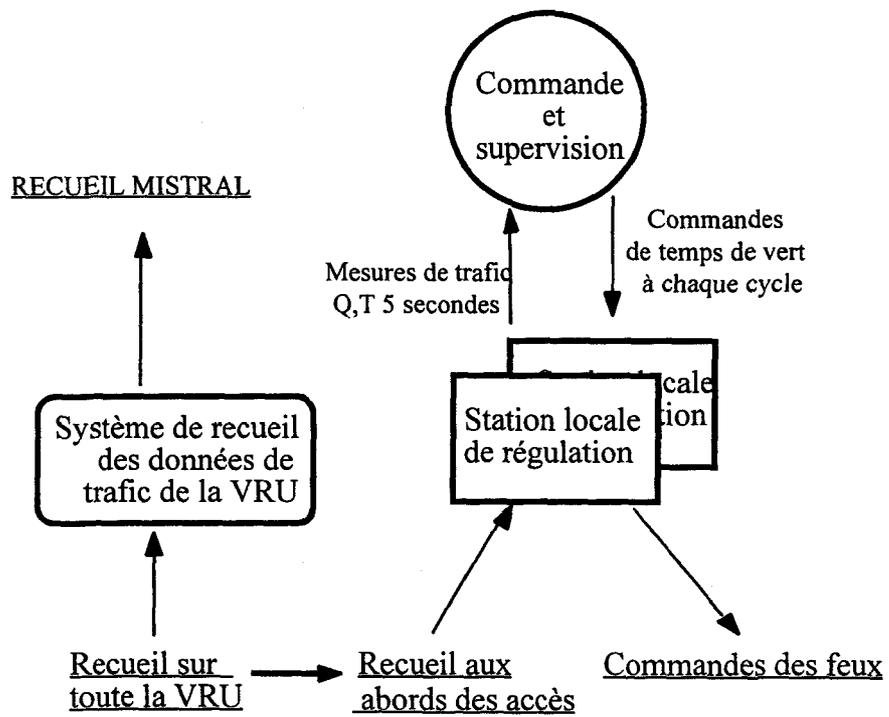


Fig. VI.8. : Organisation prévue de la régulation d'accès sur A64

VII. PERSPECTIVES

Le bilan des chapitres précédents

La régulation des accès d'une voie rapide a donc pour objectifs :

- de maintenir la fluidité du trafic sur tout ou partie de cette voie et du réseau associé connexe,
- de retarder l'apparition des congestions récurrentes (à la limite de saturation un excès de demande de l'ordre de quelques % entraîne une chute de débit de plusieurs dizaines de %),
- de favoriser le retour à la fluidité lors d'une congestion récurrente ou accidentelle.

La régulation d'accès a donc pour effet de répartir dans le temps la demande sur les accès (écrêtage des pointes de trafic) et ainsi de maintenir le débit de la voie rapide à un niveau optimal.

Parmi les réticences rencontrées lors de l'installation d'une régulation d'accès par feux, il y a celles, objectives, liées aux difficultés de circulation aux abords des accès et celles, subjectives, liées à la mauvaise perception par l'utilisateur d'un équipement considéré comme contraignant et éventuellement à une dégradation du trafic sur les itinéraires parallèles. Ces réticences peuvent être le plus souvent atténuées par la diffusion d'informations et par certains dispositifs techniques.

La plupart des difficultés objectives rencontrées lors de l'installation d'une régulation d'accès sont dues à l'absence de prise en compte des remontées de file d'attente sur les bretelles d'accès mais surtout à l'utilisation de plans de feux à cycle fixe ne correspondant pas à l'état réel du trafic. Leur solution est avant tout technique :

- la file d'attente peut être contenue dans des limites acceptables par un dispositif qui prend en compte sa longueur dans le calcul du plan de feux ;

- la crédibilité de la régulation d'accès est conservée par l'utilisation d'une stratégie de régulation adaptative «collant» le mieux possible aux configurations de trafic.

Certains usagers peuvent percevoir le dispositif de régulation d'accès comme une contrainte supplémentaire introduite dans leur trajet, contrainte limitant leur possibilité d'accès à la voie rapide considérée comme un espace de liberté. Il s'agit d'une première impression négative qui peut être atténuée par une campagne d'explications présentant les bénéfices globaux de l'opération. Cette impression est d'ailleurs provisoire : à l'usage, l'automobiliste perçoit de lui-même l'intérêt du système. Ainsi lors d'une panne du système de régulation sur l'autoroute A1 en Ile-de-France, des usagers se sont plaints, demandant le rétablissement du système.

L'allongement de la file d'attente aux accès régulés est souvent considéré par l'utilisateur comme une perte de temps. Il s'agit, là aussi, d'un problème d'information : avec un système bien conçu, le temps d'attente sur la rampe d'accès est largement compensé par l'amélioration des conditions de circulation sur la voie rapide, ainsi que le démontrent de nombreuses expériences.

Cependant, pour des trajets courts, le temps d'attente sur la rampe d'accès peut être dissuasif et conduire à un changement d'itinéraire via le réseau parallèle (type de délestage, marginal mais favorable cependant au fonctionnement global du réseau de VRU et du réseau associé), la régulation d'accès privilégiant somme toute des trajets suffisamment longs (quelques tronçons de la voie rapide). Dans certaines configurations de réseaux, on peut constater un report de trafic de la voie rapide vers le réseau de surface associé.

Pour parer à toute difficulté de cet ordre, des études amont d'affectation sont nécessaires au cas par cas. Ces études doivent prévoir l'impact du système de régulation envisagé, déterminer la meilleure stratégie à employer, et définir la zone à réguler et le type de régulation. En plus des critères purement techniques de performance du système, ces études servent aussi à préparer au mieux les négociations et les arbitrages nécessaires entre l'État et les collectivités locales.

Des expérimentations sont donc nécessaires

Afin de mesurer correctement l'impact de telles mesures et éviter la spirale des interrogations, il est nécessaire de concevoir des expérimentations qui puissent mettre en évidence avec une ambiguïté moindre les avantages et les inconvénients. C'est pourquoi un groupe de travail a été constitué en 97 et plusieurs sites ont émis la volonté d'être des sites pilotes.

Les expérimentations de la régulation des accès devront donc être réalisées sur des sites répondant aux caractéristiques, entre autres, suivantes :

- la zone expérimentale doit être une VRU où la congestion résulte de l'insuffisance de capacité de la VRU et non du bouchage de ses sorties ou d'un problème de géométrie de l'accès,

- la zone expérimentale doit comprendre au moins trois accès régulés successifs immédiatement à l'amont de la zone de déclenchement de la congestion ceci afin de renforcer la significativité de l'expérience,

- on doit observer des bouchons récurrents dans la zone expérimentale (pointe du matin ou du soir),

- il est nécessaire que les sorties de la VRU soient situées assez loin des accès de la zone expérimentale, ceci afin de minimiser les cisaillements entre voies, sources de perturbation pour l'évaluation du concept,

- il est nécessaire que les accès aient un trafic homogène (pourcentage régulier de poids lourds par exemple),

- l'accès doit se faire sur une seule voie pour des commodités d'interprétation dans cette première phase,

- il serait intéressant que la zone expérimentale soit pourvue de stations de recueil en nombre suffisant (d'un point de vue de l'expérimentation et non de la mise en place effective des stratégies envisagées) pour assurer le recueil des données de trafic

nécessaires à l'évaluation des concepts et des méthodes, et de PMV utilisables pour l'information liées à l'expérimentation. Toutefois, ces équipements peuvent aussi faire partie d'un dispositif expérimental s'ils n'existent pas au départ.

L'évaluation des résultats de l'expérimentation consisterait à mesurer l'impact de la régulation des accès sur les conditions de circulation par l'analyse des données de trafic accumulées durant toute la phase expérimentale dans la zone. L'analyse porterait sur les conditions de circulation dans la zone d'évaluation, et sur les «zones» adjacentes (réseau associé de surface en particulier).

Nota : L'opération de régulation d'accès devrait s'accompagner d'un plan de communication visant à présenter les efforts faits pour l'amélioration des conditions de circulation. Cette communication devrait être faite en direction :

- des usagers par la mise en place de panneaux d'informations et la distribution d'affichettes ;*
- des collectivités locales riveraines par l'association des services techniques municipaux à l'opération, et la présentation d'une note explicative aux élus ;*
- des services préfectoraux par la présentation d'une note explicative accompagnant la demande de promulgation des arrêtés concernant les plages horaires de modification des priorités.*

VIII. CALCUL THEORIQUE

Ce paragraphe apporte des compléments de nature théorique à l'exemple de calcul de gain présenté au chapitre III paragraphe III.3.

Première situation : pas de régulation de l'accès

Le diagramme suivant présente le débit écoulé dans le temps en tenant compte de la situation de saturation. Ce diagramme fait apparaître le retard $d(t)$ individuel induit par la congestion.

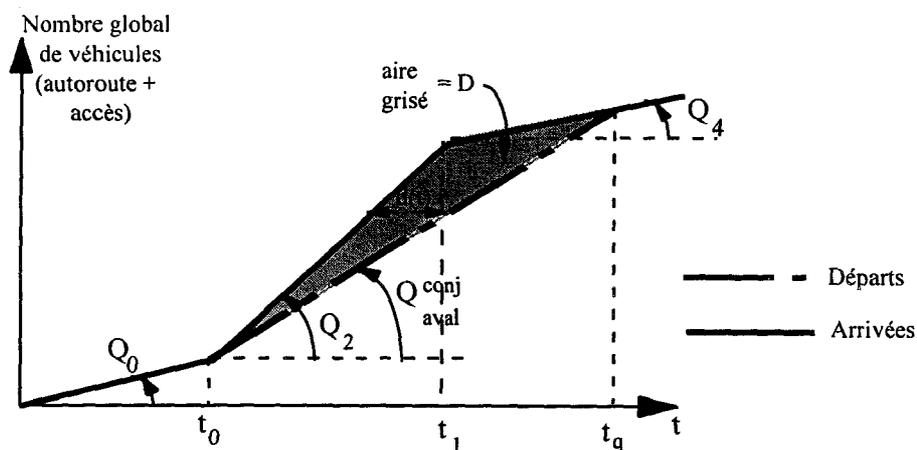


Fig. VIII.1. : Evolution du débit écoulé sans régulation

Le calcul des indicateurs s'effectue alors selon les formules suivantes :

- Temps de fin de congestion :

$$t_q = \frac{1}{Q_{\text{aval}}^{\text{conj}} - Q_4} [Q_2 (t_1 - t_0) + Q_{\text{aval}}^{\text{conj}} t_0 - Q_4 t_1]$$

- Nombre de véhicules influencés par la congestion :

$$N_{\text{max}} = (Q_2 - Q_{\text{aval}}^{\text{cong}})(t_1 - t_0)$$

- Temps perdu total en heures.véhicules :

$$D = Q_2 \left[\frac{(t_1 - t_0)^2}{2} + (t_1 - t_0)(t_1 - t_1) \right] + Q_1 \frac{(t_1 - t_1)^2}{2} - Q_{\text{aval}}^{\text{cong}} \frac{(t_0 - t_0)^2}{2}$$

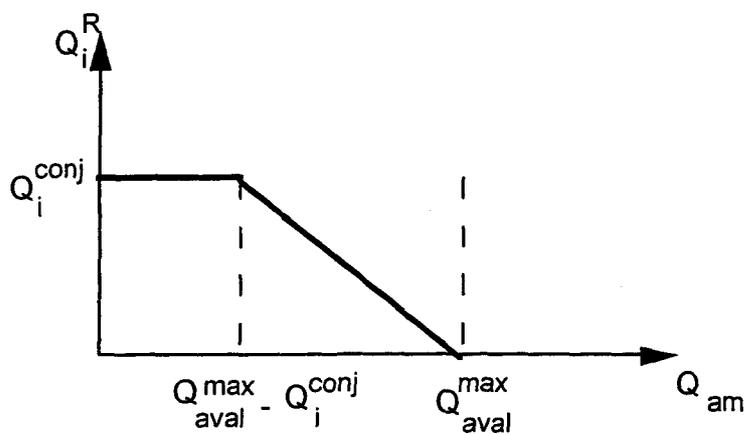
- Temps perdu individuel :

$$\text{si } t \in [t_0, t_1] \quad d(t) = \left[\frac{Q_2}{Q_{\text{aval}}^{\text{cong}}} - 1 \right] (t - t_0)$$

$$\text{si } t \in [t_1, \infty[\quad d(t) = t_0 - t + \frac{Q_2}{Q_{\text{aval}}^{\text{cong}}} (t_1 - t_0) + \frac{Q_1}{Q_{\text{aval}}^{\text{cong}}} (t - t_1)$$

Deuxième situation : avec régulation de l'accès

Dans cette situation le trafic est congestionné uniquement sur la bretelle donc la capacité possible est Q_i^{cong} . Les domaines de validité se caractérisent par le schéma suivant :



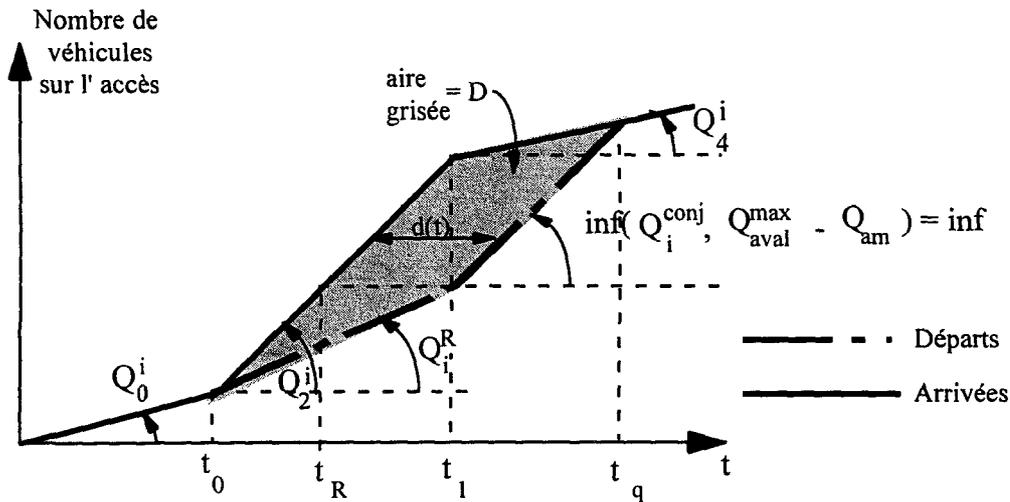


Fig. VIII.2. : Evolution du débit écoulé avec régulation

Par souci d'homogénéité avec les notations précédentes, nous avons ajouté un exposant i sur les variables ad hoc.

Comme précédemment les mêmes indicateurs peuvent être calculés :

- Temps de fin de congestion :

$$t_q = \frac{Q_4^i t_1 - Q_2^i (t_1 - t_0) + (Q_{aval}^{max} - Q_{am}) (t_1 - t_0) - \inf t_1}{Q_4^i - \inf}$$

- temps perdu total en heures.véhicules :

$$D = (Q_2^i - Q_i^R) \frac{(t_1 - t_0)^2}{2} + Q_2^i (t_1 - t_0) (t_q - t_1) + Q_4^i \frac{(t_q - t_1)^2}{2} - Q_i^R (t_1 - t_0) (t_q - t_1) - \inf \left(\frac{(t_q - t_1)^2}{2} \right)$$

- Temps perdu individuel :

$$\text{si } t \in [t_0, t_R] \quad d(t) = \left[\frac{Q_2^i}{Q_i^R} - 1 \right] (t - t_0)$$

$$\text{si } t \in [t_R, t_1] \quad d(t) = t_1 - t + \frac{Q_2^i (t - t_0) - Q_i^R (t_1 - t_0)}{\inf}$$

$$\text{si } t \in [t_1, t_q] \quad d(t) = t_1 - t + \frac{(Q_2^i - Q_i^R)(t_1 - t_0) + Q_4^i(t - t_0)}{\text{inf}}$$

IX. GLOSSAIRE

Les termes utilisés dans ce document sont pour la plupart définis dans le «*Glossaire des termes du domaine de l'exploitation de la route*» élaboré par le SETRA dans son édition de Décembre 96 et ne sont pas repris dans ce chapitre. Seuls ceux utilisés spécifiquement dans le cadre de ce document sont repris ci-après.

Contrôleur d'accès

Automate commandant le fonctionnement des feux de circulation, des équipements dynamiques de prescription et de présignalisation d'un ou de plusieurs accès à une autoroute ou une voie rapide, assurant le déroulement des cycles de feux et le respects des contraintes de sécurité.

Ecoulement au goutte à goutte

Méthode de régulation d'accès avec des feux de circulation qui consiste à écouler le trafic entrants de la bretelle d'accès **véhicule par véhicule** afin de favoriser une meilleure insertion des véhicules entrants dans le trafic de la voie rapide. Cet écoulement est obtenu par l'utilisation de cycle de feux très courts et de capteurs détectant le franchissement de la ligne de feux par les véhicules.

Ecoulement par peloton

Méthode de régulation d'accès avec des feux de circulation dont l'alternance des cycles a pour conséquence d'organiser le flot des véhicules de la bretelles d'accès, entrants sur la voie rapide, en «paquet» dont la taille dépend de la durée de vert.

Gestion des flux

Ce terme est utilisé dans ce document pour la régulation des accès à bretelle multiple. Dans ce cas le dispositif de régulation d'accès a pour but non seulement de limiter la demande de véhicules entrants mais aussi de répartir la durée de vert selon les différentes bretelles qui convergent au niveau de l'accès.

Gestion des remontées de file d'attente

La régulation des accès d'une voie rapide par des feux de circulation peut avoir pour conséquence l'apparition de file d'attente en amont des feux sur les bretelles d'accès. La prise en compte de ces files d'attente est souvent nécessaire afin d'éviter la saturation de carrefours situés en amont de l'accès sur le réseau de surface. La longueur de ces files d'attente doit être prise en compte comme un paramètre de la stratégie de régulation de l'accès.

Régulation d'accès

Ce terme est utilisé dans ce document à la place du terme «contrôle d'accès», défini dans le Glossaire du SETRA. Il s'agit d'une technique de régulation du trafic d'une infrastructure routière consistant à agir sur le débit de véhicules entrants sur une section au moyen de signaux appropriés, de barrières physiques ou d'aménagement d'infrastructure.

Régulation d'axe

La régulation d'axe consiste à mettre en oeuvre des techniques de régulation de tous les accès d'une portion d'autoroute dans le but d'assurer globalement la fluidité du trafic sur l'ensemble de la section.

Régulation localisée

La régulation localisée consiste à mettre en oeuvre des techniques de régulation d'accès sur un ou plusieurs accès consécutifs dans le but d'améliorer le fonctionnement de l'autoroute au voisinage d'un accès perturbant ou d'un point critique.

Régulation par barrière

La régulation par barrière est une technique qui consiste à fermer provisoirement un accès pendant une durée déterminée afin de permettre le retour plus rapide à la fluidité de la voie rapide.

Régulation dynamique

La régulation dynamique consiste à mettre en place des équipements dynamiques de régulation d'un accès (feux de circulation, barrières,...), ayant un fonctionnement intermittent et qui sont utilisés principalement en période de forte demande. En dehors de

ces périodes, ces équipements ne sont pas utilisés et il n'y a pas de restriction sur ces accès.

Régulation statique

La régulation statique consiste à mettre en place un aménagement ou un balisage permanent sur un accès ayant pour conséquence une limitation de la capacité de cet accès.

Stratégie à cycle de feux fixe, ou Stratégie à feux fixes

Une stratégie de régulation à cycle de feux fixes est une stratégie de régulation mise en oeuvre aux moyens de feux de circulation dont les cycles de feux sont déterminés à priori en fonction de mesures de trafic. Les cycles de feux peuvent être activés soit manuellement par un exploitant du réseau, soit automatiquement par une horloge, soit par des mesures de trafic.

Stratégie de régulation

Une stratégie de régulation est un ensemble de règles visant à définir le flot optimal des véhicules entrants sur un accès à une voie rapide permettant d'éviter la congestion en section courante, en fonction de critères déterminés : mesure de débit, heure de la journée, commande opérateur, état du réseau de surface...

Stratégie de régulation adaptative

Une stratégie de régulation adaptative est une stratégie dont les règles de fonctionnement sont fixées par une loi mathématique associant débit autorisé de l'accès à une mesure du trafic effectuée en temps réel. La plupart des stratégies adaptatives calculent la durée de vert donc le débit de l'accès en fonction de mesures de trafic effectuées sur la voie rapide en amont et en aval de l'accès.

Stratégie de régulation coordonnée

Une stratégie de régulation coordonnée est une stratégie adaptative qui vise à améliorer globalement le fonctionnement d'une portion d'un réseau et qui prend en compte les paramètres de circulation sur la totalité de ce réseau.

Stratégies Synchronisées

Plusieurs stratégies adaptatives locales qui assurent chacune la régulation du trafic au voisinage d'un accès, peuvent être synchronisées afin que chacune d'elle puissent prendre en compte des situations de trafic au delà de sa zone d'influence : ainsi des congestions qui apparaissent très en aval d'un accès peuvent être intégrées dans le calcul des cycles de feux sur cet accès.

X. REFERENCES

- AIPCR (1991), *Exploitation et gestion - Question III-*, XIX^e Congrès Mondial de la Route, MARRAKECH, Septembre 1991
- BESNARD S. (1986), *Les équipements d'exploitation de la route : conception et maintenance*, Revue Travaux N° 616, Décembre 1986
- BHOURI Neïla (1991), *Commande d'un système de trafic autoroutier : application au Boulevard Périphérique de Paris*, Thèse de l'Université de Paris-Sud, 1991, 176p.
- BIEBER A., FERRY B. et TEXIER P.Y. (1993), *Conséquences pour l'aménagement des innovations routières attendues vers 2000-2020 : Essai de prospective*, Synthèse de l'INRETS N° 20, Janvier 1993
- BLOSSEVILLE J.M., HAJ SALEM H. et GUICHARD D. (1990), *Gestion du Trafic sur autoroute : pratiques actuelles et futures*, Revue générale des routes et des aérodromes N° 674, Mai 1990
- BLOSSEVILLE J.M., HAJ SALEM H. et PAPAGEORGIU M. (1988), *Modélisation et contrôle du Boulevard Périphérique de Paris*, Second Congrès Technique de l'ATEC, 15-17 NOVEMBRE 1988, Paris

-
- BLOSSEVILLE J.M., *Stratégie adaptative de contrôle d'un accès à une autoroute*, rapport IRT, 1985

 - BONVALET F. et ROBIN-PREVALLEE Y. (1990), *Indicateurs globaux de la circulation sur réseau construits à partir des données centralisées d'un système d'exploitation*, Recherche Transports Sécurité N° 28, Décembre 1990

 - CETE Méditerranée. (1991), *L'exploitation des autoroutes de Marseille en 1990*, CETE Méditerranée DIT, Avril 1991

 - CERTU (1996), *Guide méthodologique Exploitation des réseaux principaux d'agglomération. Schéma Directeur d'Exploitation de la Route - réseaux de niveau 1*, rapport d'étude, décembre 1996

 - CHRISOULAKIS J. (1992), *Review and assessment of urban, interurban & corridor modelling & control tools*, DRIVE II Project V2017, Deliverable N° 1, Workpackages N°1.1 & 1.2, June 30, 1990

 - COHEN S. (1988a), *La régulation du trafic, hier, aujourd'hui, demain*, RTS N° 20, pp.13-18, 1988

 - COHEN S. (1988), *Cartographie automatique des bouchons et surveillance des voies rapides et des autoroutes urbaines*, TEC N° 90-91, 1988, PP.22-26

- COHEN S. (1990) *Ingénierie du trafic routier : Eléments de théorie du trafic et applications*, Cours de l'ENPC

- DDE-RHONE (1989), *CORALY : Coordination et Régulation du Trafic sur les voies rapides de l'agglomération lyonnaise*, Dossier de présentation, Avril 1989

- DE BALINCOURT E. (1989), *Exploitation du réseau de voies rapides de l'Ile-de-france -- Proposition d'une stratégie d'utilisation des panneaux à message variable*, Mémoire de DEA, ENPC, 1989, 60p + annexes

- DELTHIL G. (1992), *Expérimentation du contrôle d'accès périphérique, Mai-Juin-Juillet 1992*, Mairie de Paris, Direction de la Voirie, N° 17852, Octobre 1992

- DIAKAKI C., PAPAGEORGIOU M. (1994), *Design and Simulation Test of Coordinated Ramp-Metering Control (METALINE) For A10-West In Amsterdam*, ATT-Project EUROCOR V2017, Technical University of Crete, Crete, Greece, August 1994

- DREIF (1988), *SIRIUS - Dossier programme*, Décembre 1988

- DREIF/INRETS/DDE 94 (1987), *Exploitation des voies rapides*, Rapport de mission : première partie : Etats-Unis-RFA, Avril 1987 ; deuxième partie : Japon-ANGLETERRE, Novembre 1987

-
- DSCR , *Exploiter la route : cadre de réflexion*, document publié par la Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière du Ministère de l'Équipement et Secrétariat d'état aux transports routiers et fluviaux, décembre 1991.
 - DUDEK C.L. et al. (1974), *Study of Detector Reliability for a Motorist Information System on the Gulf Freeway*, In Transportation Research Record N° 495, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1974, pp 35-43
 - DURAND-RAUCHER Y. (1990), *L'autoroute intelligible - le pari de l'information routière comparative en région parisienne*, Revue Travaux, Décembre 1990, 6 pages
 - DURAND-RAUCHER Y. (1992), *L'information, vitrine du niveau de service*, TEC N° 115, Novembre-Décembre 1992
 - DURAND-RAUCHER Y. (1993), *Variabilité comportementale en matière de pratique des déplacements : l'exemple de l'information routière en région Ile-de-France*, TEC N° 121, Novembre-Décembre 1993
 - DWIGHT W. BRIGGS COMSIS, BENJAMIN V.CHATFIELD (1987), *Integrated highway information systems*, Transportation Research Board, October 1987, NCH SNY 133

- FHWA (1983), *A freeway management handbook - Volume 1 : Overview*, US Department of Transportation / Federal highway administration, May 1983

- FHWA (1987), *Working paper No. 10 : Urban and suburban highway congestion, The national highway program 1991 and beyond*, Federal highway administration, Washing D.C., December 1987

- FOURNIER P. (1992), *Perspectives du réseau autoroutier communautaire horizon 2010*, Revue Transport N° 353, Mai-Juin 1992, pp. 150-158

- GAO (1989a), *Traffic congestion : Trends, Measures, and Effects*, United States General Accounting Office, GAO/PEME-90-1, November 1989

- GAO (1989), *Traffic congestion: Federal efforts to improve mobility*, United States General Accounting Office, GAO/PEME-90-1, December 1989

- GARDES Y (CERTU) et LANCELIN C (SRILOG), *La régulation des accès sur voies rapides : un outil d'exploitation efficace trop peu utilisé*, Revue TEC N° 132 - Septembre-Octobre 1995

- GARDES Y. et RICARD F. (1991), *Modèles de guidage dynamique des véhicules : deux exemples américains*, TEC N° 109, Novembre-Décembre 1991

-
- HADJ SALEM H. et al., (1988) *ALINEA : un outil de régulation d'accès isolé sur autoroute - étude comparative sur site réel*, Rapport INRETS N° 80, Octobre 1988
 - HADJ SALEM H. et al., (1991) *Régulation d'accès isolé et coordonné sur voie rapide : étude comparative sur site réel*, Rapport convention AFME-INRETS N° 8813, Juin 1991
 - HAJ SALEM H. /INRETS-DART, (1993) *Evaluation de l'impact du contrôle d'accès sur le corridor périphérique*, Mars 1993
 - IVHS AMERICA (1992), *Strategic plan for IVHS in the U.S.*, DRAFT B, January 1992
 - KEVIN N. BALKE (1993), *An evaluation of existing incident detection algorithms*, Research Report 1232-20 of Texas Transportation Institute, November 1993
 - KOBLE H. M., ADAMS T.A., SAMANT V.S., *Control strategies in response to freeway incidents*, rapport N° FHWA/RD-80/005, Novembre 1980
 - KOSHI M. (1991), *Road Transport Problems in Urban Areas an Future Perspectives in Japan*, IATSS Research : The Journal of International Association of Traffic and Safety Sciences, 1991

- LATERRASSE J. et ZHANG M.Y (1994), *Mise en oeuvre opérationnelle de SIRIUS : Analyse des aspects organisationnels et humains*, Rapport réalisé pour le SERT / Ministère de l'Équipement, du Logement et des Transports, Juillet 1994

- LEMAITRE G. (1993), *Un espéranto pour équipements dynamiques*, TEC N° 118, Mai-Juin 1993, pp. 8-13

- LESORT J.B. (1989), *La régulation du trafic*, Revue la Recherche N° 214, Octobre 1989

- LINDLEY J.A. (1989), *Urban freeway congestion, problems and solutions : an update*, ITE Journal, Decembre 1989, pp.21-23

- MAY A.D. (1981), *Models for freeway corridor analysis*, TRB Special Report 194, 1981, pp.18-32

- MCSHANE W.R. and ROESS R.P. (1990), *Traffic engineering*, New Jersey USA, Prentice-Hall int., 1990, 657 p.

- MESSMER ET PAPAGEORGIU (1990), *METANET - macroscopic simulation programme for motorway networks*, Traffic Engineering and Control, Aug/Sept. 1990, Vol.31, N°8/9, pp. 466-470

-
- MIDDELHAM F., PAPAGEORGIU M., HAJ-SALEM H. (1994), *WP4.1 + WP4.2 - Fully Integrated Control Design*, ATT-Project EUROCOR V2017, Deliverable 9A, AVV, Rotterdam, The Netherlands, September 1994
 - MIDDELHAM F., SCHOUTEN W.J., CHRISOULAKIS J., PAPAGEORGIU M., HAJ-SALEM H.(1994), *EUROCOR and A10-West : Coordinated Ramp-Metering Near Amsterdam*, Proceedings of the First World Congress on ATT&IVHS, ERTICO, Artechn House Boston/London, United Kingdom, December 1994, pp. 1158-1165
 - MILLE Ch. (1991), *Cartographie dynamique des bouchons récurrents autour de Paris*, Rapport du stage de l'ENPC , 30p + annexes
 - Ministère de l'Équipement (1989a) *Prospective de l'exploitation de la route*, UTH 2001, Délégation à la recherche et à l'innovation/Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de la Mer, Novembre 1989
 - Ministère de l'Équipement (1992), *La route au quotidien, Thème 3 : Traitement des perturbation de Trafic*, Cycle d'étude 1989-91, Ministère de l'Équipement, du Logement, des Transports et de l'Espace, Février 1992
 - MORIN J.M. (1987), *Etat de l'art de l'exploitation des autoroutes urbaines à l'étranger*, Note de synthèse, INRETS/DART, Juin 1987

- MORIN J.M. (1988), *La régulation du trafic dans un réseau maillé autoroutier urbain et périurbain -- Le cas de l'Ile-de-france*, Rapport INRETS N° 63, Avril 1988, 83 p
- MORIN J.M.(1981), *Etude du feu optimal en un accès contrôlé*, rapport IRT, Juillet 1981
- MORIN J.M., GOWER P., PAPAGEORGIU, and MESSMER A. (1991), *Motorway networks : modelling and control*, Advanced telematics in road transport -- Proceeding of the DRIVE conference, Volume I, ELSEVIER SCIENCE PUBLISCHERS B.V., 1991
- PAPAGEORGIU Markos (1988), *Modelling and real time control of traffic flow on the southern part of boulevard périphérique de Paris*, rapport de contrat INRETS, June 1988, 103 p + annexes
- PAPAGEORGIU Markos (1991), *Concise encyclopaedia of Traffic & transportation systems*, UK, Pergamon Press, 1991, 633 p
- PAPAGEORGIU Markos (1987), *Modelling and real-time control of traffic flow on the south part of Boulevard Périphérique de Paris*, Rapport de contrat INRETS, Septembre 1987

-
- PAYNE H.J. (1971), *Models of freeway traffic and control*, Simulation Council Proc N° 1, 1971, pp. 51-56
 - REISS ROBERT A. (1991), *Dynamic control and traffic performance in a freeway corridor : a simulation study*, Transportation Research, vol 25 A, N° 5, September 1991, pp. 267-276
 - RTS (1990), *Spécial Gestion du Trafic* (1990), Revue de l'INRETS, Recherche-Transports-Sécurité n° 28, Décembre 1990
 - SANTIAGO A.J. and CHEN H. (1991), *Traffic modelling needs for advanced traffic management systems (ATMS)*, OECD/Road Transport Research Programme, Proceedings of a seminar, Chiba, Japan, June 4-6, 1991, pp. 379-389
 - SETRA (1989), *L'information routière, extraits relatifs aux besoins et enjeux*, Rapport d'Etude, SETRA, 1989
 - SETRA (1993), *Schéma directeur d'exploitation de la route : Premiers éléments de réflexion pour l'organisation des services*, SETRA, Mars 1993
 - SETRA (1996), *503 mots de l'exploitation de la route, Glossaire*, SETRA, Décembre 1996

- SIER (1993), *Bilan et perspectives de SIRIUS*, DREIF/SIER, Novembre 1993
- SIER (1994), *SIRIUS : Système d'Information pour un Réseau Intelligent aux Usagers*, Dossier de presse SIRIUS/Conférence du 18 Janvier 1994, Document interne du SIER, Janvier 1994
- SIER (1994), *Cahier des charges d'un dispositif de régulation d'accès destiné à SIRIUS*, Réf. SRILOG, C. LANCELIN, Juin 1995
- SIER, *Expérimentation du contrôle d'accès adaptatif sur l'autoroute A6*, Réf. SRILOG, C. LANCELIN, Mars 1994
- STEPHERD S. (1994), *Traffic control in over-saturated conditions*, Traffic Reviews, 1994, Vol.14, N°1, pp. 13-43
- STEVEN A. SMITH, and CESAR E. PEREZ (1992), *Evaluation of INFORM-Lessons learned and application to other systems*, prepared for the 1992 Annual meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.
- TAALE H., *Analysis of the local effects of ramp metering on two junctions with the motorway A10-West using FLEXSYST*, Décembre 1992,

-
- TAALE H., W.J.J.P. SCHOUTEN, J. van KOOTEN, *Design of a Coordinated Ramp-Metering System Near Amsterdam*, Seventh International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, Publication 391, The Institution of Electrical Engineers, London, UK, April 1994, pp. 185-189

 - TEXAS (1993), *Advanced traffic management systems plan : a building bloc to IVHS in Texas*, Traffic management section/Division of maintenance and operations, Texas Department of Transportation, April 1993

 - TORDJMAN D., MIDDELHAM F. , HAJ -SALEM H. e.a., *WP5.2 - Field Trails Spécification And Design*, ATT-Project EUROCOR V2017, DELIVERABLE 8, SRILOG, Velizy, France, June 1994

 - TR (1991), *Dynamic control of urban traffic networks (part II)*, Transportation Research Vol. 25A. N° 5, September 1991

 - TRB (1981), *The Application of Traffic Simulation Models*, Special Report 194, Proceeding of a Conference on the Application of Traffic Simulation Models, June 3-5, 1981, Transportation Research Board / National Academy of Sciences, Washington, D.C.

 - TRB (1991), *Freeway Operations, Highway Capacity, and Traffic Flow*, Transportation Research Record, N° 1320, 1991, TRB, Washington, D.C.

- V. VELZEN G.A., DE HAES F., TAALE H. and MIDDELHAM F., *Evaluation Studies of ramp metering*, Proceedings 22nd European Transport Forum , PTRC (sept. 1994) J241-J252
- VAN AERDE, and YAGAR S. (1988), *Dynamic integrated freeway/traffic signal network : a routing based nodelling approach*, Transportation Research, Vol. 22A, 1988
- VERDIER P. (1987), *Le fonctionnement et l'exploitation du réseau régional des voies rapides d'Ile-de-france*, Revue générale des routes et des aérodromes, N° 646, Novembre 1987, 11 p
- VEXIAU T. (1992), *Exploiter la route*, TEC N° 111, Mars-Avril 1992
- WINGHART J.A. (1987), *Informatique et gestion du trafic*, Revue PCM N° 11, 1987, pp. 35-37
- ZHANG M.Y., *Apports des systèmes d'information à l'exploitation des réseaux de voies rapides - Le cas du réseau d'Ile-de-france*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Thèse 95501, Janvier 1995

- ZHANG M.Y., BLOSSEVILLE J.M., MOTYKA V. et LATERRASSE J. (1994), *Automatic Congestion Detection (ACD) on urban an suburban expressway networks*, Paper presented in the 7th Symposium on Transportation Systems (Theory and application of advanced Technology, August 24-26, 1994 TianJin, China

© Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement
Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Impression: CETE de Lyon 04 72 14 30 30
Achevé d'imprimer: décembre 1997
Dépôt légal: 4^e trimestre 1997
ISSN: 1265-2570
ISRN Certu RE 97-18

Cet ouvrage est en vente au CERTU
Bureau de vente:
9, rue Juliette-Récamier
69456 Lyon Cedex 06
04 72 74 59 28

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du CERTU est illicite (loi du 11 mars 1957).
Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425
et suivants du code pénal.

