
*Corinne BRABAN
Florence BOILLLOT*

***LES SYSTEMES TEMPS REEL
DE COMMANDE DE FEUX EN
MILIEU URBAIN***

*Synthèse n°44
Avril 2003*

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Les auteurs :

Corinne BRABAN, chercheur à T&S – Chargé de mission à l'INRETS –
GRETIA,

e-mail : corinne.braban@free.fr

Florence BOILLOT, chercheur à l'INRETS – GRETIA,

e-mail florence.boillot@inrets.fr

Les Unités de recherche :

T&S : School of Transportation and Society

Université du Dalarna, S-78188 Borlänge, Suède

INRETS – GRETIA Laboratoire Génie des Réseaux de Transport et
Informatique Avancée

2 avenue du Général- Malleret-Joinville 94114 Arcueil Cedex, téléphone: 01 47
40 70 00

Cette synthèse a bénéficié des remarques et commentaires des référés
suivants :

Gérard SCEMAMA, Directeur de Recherche, INRETS – GRETIA

Jean-Loup FARGES, Chercheur, CERT, Toulouse



N° ISBN : 2-85782-587-0

N° ISSN : 0769-0274

© : Les collections de l'Inrets

PRIX : 15,24 € T.T.C. — (T.V.A. 5,5 %)

Les commandes doivent être adressées à : **INRETS - Services des publications** -
2, av. du Général Malleret-Joinville - 94114 ARCUEIL CEDEX, accompagnées d'un chèque
bancaire ou postal à l'ordre de : l'Agent Comptable de l'INRETS, ou dans le cas d'une
administration, d'un bon de commande. Pour les pays de l'UE se reporter à la réglementation
intracommunautaire en matière de TVA. Pour l'étranger (hors UE), déduire la TVA.

Fiche bibliographique

1 UR (1^{er} auteur) GREZIA	2 Projet n°	3 Synthèse INRETS n° 44	
4 Titre Les systèmes temps réel de commande de feux en milieu urbain			
5 Sous-titre		6 Langue F	
7 Auteur(s) Corinne BRABAN Florence BOILLOT		8 Rattachement ext. T&S - Suède INRETS-GREZIA	
9 Nom adresse financeur, co-éditeur		10 N° contrat, conv.	
		11 Date de publication Avril 2003	
12 Remarques			
13 Résumé <p>Les feux tricolores jouent un rôle important dans la gestion du trafic en milieu urbain : ils permettent d'abord d'assurer la sécurité des véhicules et des piétons en partageant dans le temps l'utilisation d'un même espace entre des flux conflictuels. Mais par le choix des durées de chaque couleur (vert, rouge) et par la synchronisation des feux entre eux, ils permettent aussi de gérer l'écoulement de la demande. Différentes méthodes et une multitude d'outils existent pour assurer cette gestion par les feux. Parmi eux, les systèmes dits « adaptatifs » fournissent des moyens novateurs pour la gestion du trafic.</p> <p>L'objectif de cette synthèse est de décrire les systèmes dits "adaptatifs" les plus connus qui sont aussi les plus documentés dans la littérature. Une première catégorie se compose des systèmes SCOOT, SCATS, UTOPIA, PROLYN, OPAC ayant acquis une certaine notoriété publique; ils sont implantés de manière opérationnelle dans des villes. Une deuxième catégorie regroupe des systèmes plus récents MOVA, MOTION, CARS, CRONOS, qui ont fait au moins l'objet d'études en simulation, voire même d'implantation expérimentale sur site; ils existent depuis plusieurs années et ont fait l'objet de plusieurs publications. Ils sont décrits plus succinctement.</p> <p>Nous avons voulu décrire ces systèmes selon un même plan. Les principales parties en sont : la modélisation du trafic, la méthode de régulation, l'évaluation des performances sur site, le récapitulatif des caractéristiques et des variables de trafic utilisées, une bibliographie. Cette synthèse ne constitue pas une analyse critique des différents systèmes mais l'idée est de rassembler, dans un même document, les principes généraux de ces systèmes sur la base des articles disponibles.</p>			
14 Mots clés Commande de feux, milieu urbain, systèmes adaptatifs		15 Diffusion libre	
16 Nombre de pages 113	17 Prix 15,24 euros	18 Confidentiel non	19 Bibliographie oui

Publication data form

1 UR (1st author) INRETS-GRETIA		2 Projet n°		3 INRETS Synthesis n° 44	
4 Title Real Time Urban Traffic Control Systems					
5 Subtitle				6 Language French	
7 Author(s) Corinne BRABAN Florence BOILLOT				8 Affiliation T&S - Sweden INRETS-GRETIA	
9 Sponsor, co-editor, name and address				10 Contract, conv. N°	
				11 Publication date April 2003	
12 Notes					
13 Summary <p>Traffic signals are of fundamental necessity for managing urban traffic. Initially introduced to insure safety of both vulnerable road users and drivers, they distribute among a set of conflicting movements the temporal and spatial use of the infrastructure. Nowadays, this goes further. Selecting specific duration for the green and red lights, and synchronizing neighboring traffic signals become a powerful tool for enhancing traffic flow. Worldwide, numerous strategies are investigated for choosing the settings leading to the optimal traffic flow. Among them, adaptive strategies are showing encouraging results.</p> <p>There exists a large literature dedicated to urban traffic control systems and our purpose is to review the most popular control systems. Our attention has focussed first on systems which have gained a considerable notoriety by being intensively tested and validated on site, and made operational in various cities. The major part of the literature is dedicated to SCOOT, SCATS, UTOPIA, PRODYN and OPAC. Therefore, they are reviewed in-depth. The second part of the literature deals with fairly new systems, which, as a consequence, have been less intensively tested compared with the aforementioned ones. It includes MOVA, MOTION, CARS and CRONOS, which are briefly discussed.</p> <p>A unique framework has been applied for assessing all systems. The following key components of the system have been investigated: traffic modeling, control method, on-site assessment of performances, summary of features and traffic variables used, and key references. This report does not aim at a critical analysis of the systems, but its objective is rather to collate in a same document, and on the basis of available publications, the fundamentals of the most reported urban traffic control systems in the literature.</p>					
14 Key Words traffic control, urban environment, adaptive systems			15 Distribution statement free		
16 Nb of pages 113	17 Price 15,24 euros	18 Declassification no	19 Bibliography yes		

Table des matières

Remerciements	11
Présentation générale	13
La régulation du trafic.....	13
La régulation par les feux tricolores	13
Cadre de l'étude.....	14
Les systèmes adaptatifs.....	14
Motivations et avertissements.....	15
Bibliographie sur la génération des systèmes	16
Chapitre I	17
SCOOT	17
1 Introduction.....	17
2 Modélisation du trafic	18
3 Méthode de régulation.....	22
4 Evaluation	24
5 Derniers développements	27
6 Récapitulatif des caractéristiques	29
7 Récapitulatif des variables de trafic utilisées par SCOOT	30
8 Bibliographie.....	32
Chapitre II	35
SCATS	35
1 Introduction.....	35
2 Modélisation du trafic	36
3 Méthode de régulation.....	37
4 Evaluation	40
5 Comparaison entre Scoot et Scats	42
6 Autres développements	44
7 Récapitulatif des variables utilisées par SCATS	47
8 Bibliographie.....	47
Chapitre III	49
UTOPIA	49
1 Introduction.....	49
2 Modélisation du trafic	49
3 Méthode de régulation.....	52

4	Evaluation	56
5	Récapitulatif des caractéristiques.....	57
6	Récapitulatif des variables du trafic utilisées par UTOPIA	58
7	Bibliographie	60
Chapitre IV		61
PRODYN		61
1	Introduction.....	61
2	Modélisation du trafic	61
3	Méthode de régulation	66
4	Evaluation	69
5	Récapitulatif des caractéristiques.....	74
6	Récapitulatif des variables utilisées par Prodyn.....	75
7	Bibliographie	76
Chapitre V		79
OPAC		79
1	Introduction.....	79
2	Modélisation de trafic	79
3	Méthode de régulation	80
4	Évaluation	83
5	Récapitulatif des caractéristiques.....	86
6	Bibliographie	87
Chapitre VI		89
Autres systèmes		89
1	MOVA	89
2	MOTION	91
3	CARS	94
4	CRONOS	96
Conclusion		101
ANNEXE 1		103
TRANSYT		103
1	Introduction.....	103
2	Modélisation du trafic	104
3	Détermination des plans de feux.....	106
4	Données à fournir au système	108
5	Évaluation	108
6	Mode d'exploitation	108

7	Récapitulatif des caractéristiques	110
8	Récapitulatif des variables de trafic utilisé par Transyt.....	111
9	Bibliographie.....	112

Table des illustrations

Figure 1 : Installations opérationnelles de SCOOT dans le monde	17
Figure 2 : Prédiction de la longueur de file d'attente	22
Figure 3 : Principes généraux de SCATS	35
Figure 4 : Représentation du réseau régulé par SCATS	36
Figure 5 : Modélisation de la zone sous contrôle.....	50
Figure 6 : Représentation macroscopique du réseau.....	50
Figure 7 : Synoptique général de l'architecture de régulation.....	53
Figure 8 : Régulation au niveau régional.....	54
Figure 9 : Régulation au niveau local	55
Figure 10 : Représentation d'un tronçon.....	62
Figure 11 : Bloc d'optimisation à une intersection	66
Figure 12 : Principe de l'algorithme	67
Figure 13 : Structure de commande avec simulation décentralisée des arrivées	69
Figure 14 : Fonctionnement du carrefour sur l'horizon H.....	80
Figure 15 : Découpage de l'horizon	82
Figure 16 : Horizon glissant.....	83
Figure 17 : Boucle de commande dans CRONOS.....	97
Figure 18 : Architecture de TRANSYT	103
Figure 19 : Exemple de modélisation d'un réseau.....	104
Figure 20 : Informations liées au fonctionnement du chaînon.....	106
Figure 21 : TRANSYT dans un systèmes de régulation de trafic	109

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Gérard SCEMAMA (INRETS - GRETIA) et Jean-Loup FARGES (CERT - Toulouse) pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à la relecture de ce document et pour leurs nombreuses remarques bénéfiques.

Présentation générale

La régulation du trafic

La régulation du trafic en milieu urbain se donne différents objectifs : avant tout assurer la sécurité des véhicules et des piétons sur la voirie, en particulier dans les carrefours où les conflits sont les plus nombreux, mais aussi maîtriser les retards, les congestions, la pollution, le bruit, conséquences d'une augmentation incessante du trafic, enfin assurer un certain confort.

Pour répondre à ces objectifs, la régulation revêt plusieurs aspects : d'abord un aspect statique par le choix d'une infrastructure urbaine doublée d'une signalisation appropriée; ensuite un aspect dynamique par des actions sur les flux de véhicules et de piétons au moyen

- de feux tricolores,
- de la présence d'agents de la circulation,
- de panneaux à messages variables et
- de systèmes embarqués d'information et de guidage.

La régulation par les feux tricolores

Parmi ces différents moyens d'action, les feux tricolores jouent un rôle important : ils permettent d'abord d'assurer la sécurité en partageant dans le temps l'utilisation d'un même espace entre des flux conflictuels. Mais par le choix des durées de chaque couleur (vert, rouge) et par la synchronisation des feux entre eux, ils permettent aussi de gérer l'écoulement de la demande. Différentes méthodes et une multitude d'outils existent pour assurer cette gestion par les feux. Le plan de feux pré-déterminé reste la base du système de gestion de la plus grande majorité des villes dans le monde. A cette brique de base qu'est le plan de feux, ont été adjointes des méthodes pour tenir compte :

- d'une part des fluctuations du trafic au cours de la journée - il s'agit de la programmation horaire ou celle fonction de la demande en cours (macro-régulation) - et
- d'autre part des fluctuations aléatoires du trafic à très court terme de l'ordre du cycle de feux - (micro-régulation) -.

Ces méthodes assurent au système de gestion à base de plans de feux une adaptation au trafic non négligeable et une efficacité réelle dans de larges plages de fonctionnement, dans la mesure où un suivi et une maintenance du système sont assurés.

Néanmoins, depuis une vingtaine d'années, est apparue une nouvelle famille de systèmes dits "temps réel" ou "adaptatifs" qui tendent à se démarquer des traditionnels plans de feux en offrant davantage de souplesse dans le choix des états de feux et en permettant de s'adapter à l'évolution du trafic au cours des années sans nécessiter une

réactualisation comme dans le cas des plans de feux. Cette famille regroupe en fait des systèmes extrêmement différents les uns des autres avec des méthodes et des spécificités diverses. La littérature s'enrichit régulièrement de nouvelles méthodes de régulation adaptative, mais les systèmes opérationnels et réellement implantés sur site sont finalement peu nombreux dans le monde.

Cadre de l'étude

L'objectif de cette synthèse est de décrire les systèmes dits "adaptatifs" les plus connus qui sont aussi les plus documentés dans la littérature.

Notre choix s'est porté sur deux catégories : la première se compose des systèmes SCOOT, SCATS, UTOPIA, PRODYN, OPAC ayant acquis une certaine notoriété publique; ils sont implantés de manière opérationnelle dans des villes. Chacun d'entre eux fait l'objet d'un chapitre. L'autre catégorie regroupe des systèmes plus récents MOVA, MOTION, CARS, CRONOS, qui ont fait au moins l'objet d'études en simulation, voire même d'implantation expérimentale sur site; ils existent depuis plusieurs années et ont fait l'objet de plusieurs publications. Ils sont décrits plus succinctement.

Les systèmes adaptatifs

Bien que répondant aux mêmes objectifs (optimiser un critère de trafic tel que le temps d'attente global aux carrefours), ces systèmes sont en fait tous différents quant à leur manière de résoudre le problème. Plusieurs auteurs ont tenté de classifier les systèmes les plus connus en dégagant la notion de "génération" pour montrer l'évolution que subit ce type de systèmes [Dion, Yagar, 94], [Lesort, 85], [Thiriet, Robert, Humbert, 91], [Bruno, Imbrota, 94], [Gartner, Stamatiadis, Tarnoff, 95]. Mais classifier ces systèmes est une tâche difficile car plusieurs critères de comparaison peuvent être considérés comme classificateurs et pour chacun d'eux la répartition des systèmes est différente. Une telle classification revêt donc un certain arbitraire et ne rend compte que d'une dimension du problème.

Nous nous limiterons, ici, à deux aspects importants de la régulation temps réel ; le premier est le caractère adaptatif de ces systèmes, le second aborde le problème de la coordination entre carrefours.

L'adaptabilité des systèmes

Ces systèmes sont dits adaptatifs : encore faut-il préciser pour quel phénomène.

En effet, le basculement d'un plan de feux fixes à un autre, soit par horloge, soit par la mesure d'indicateurs de trafic, donne déjà, un caractère adaptatif à la régulation (macro-régulation). Il s'agit d'une adaptation discontinue à la valeur moyenne des flux au cours de la journée.

La présence d'une micro-régulation apporte également au plan de feux une adaptation, cette fois-ci locale autour du flux moyen attendu à l'intérieur du cycle de feux.

Ces deux types d'adaptabilité font donc référence à des phénomènes sur les valeurs des flux moyens dans une même journée ou dans un cycle. Les systèmes décrits dans cette synthèse revêtent deux autres formes d'adaptabilité :

- soit une adaptation à chaque cycle permettant de faire évoluer le plan de feux pour suivre, au cours du temps (et pas seulement au cours de la journée), l'évolution du flux moyen. C'est le cas des systèmes SCOOT, SCATS, CARS, MOTION.
- soit une adaptation fréquente (de l'ordre de la seconde) conduisant à des systèmes acycliques, permettant non seulement de suivre l'évolution des flux au fil des mois mais aussi de prendre en compte les écarts observés des flux autour de leur tendance moyenne à une échelle de quelques secondes. C'est le cas des systèmes PRODYN, OPAC, UTOPIA, CRONOS.

La coordination des carrefours

Le deuxième aspect important est la manière qu'ont ces systèmes de coordonner les feux entre chaque carrefour. La gestion d'un réseau de plusieurs carrefours nécessite de prendre en compte la coordination entre carrefours, car le trafic crée des liens plus ou moins forts entre carrefours en fonction de leur charge de trafic et de leur distance aux carrefours voisins.

Là encore, il existe presque autant de méthodes de coordination que de systèmes : ainsi SCOOT, SCATS et MOTION déterminent le décalage des feux entre carrefours voisins et une durée commune de cycle pour assurer la coordination d'ensemble.

UTOPIA dispose d'un superviseur qui possède une vue globale de la situation de trafic sur tout le réseau lui permettant d'envoyer des recommandations à chaque carrefour pour leur propre régulation.

PRODYN échange des informations entre carrefours voisins pour faire connaître à chacun le réglage des feux le plus probable prévu, pour un proche futur, par ses voisins.

CRONOS propose de déterminer simultanément les états des feux pour des zones de plusieurs carrefours.

Motivations et avertissements

Nous avons voulu décrire ces systèmes selon un même plan. Les principales parties en sont : la modélisation du trafic, la méthode de régulation, l'évaluation des performances sur site, le récapitulatif des caractéristiques et des variables de trafic utilisées, une bibliographie. L'idée est de rassembler, dans un même document, les principes généraux de ces systèmes sur la base des articles disponibles.

Nous avons choisi de donner une bibliographie la plus riche possible bien que les références ne soient pas toutes citées dans le texte. Quelques renvois seulement sont

indiqués dans le texte lorsqu'il s'agit soit d'une référence importante pour le système, soit pour indiquer au lecteur la source d'un point précis.

Cette synthèse ne constitue pas une analyse critique des différents systèmes et ce pour les raisons suivantes : le contenu des articles de chaque système est d'une précision trop inégale d'un système à l'autre. De plus, les évaluations sur site ont été exécutées en des lieux et conditions différentes, ce qui rend délicate la comparaison des performances des systèmes. Les seules comparaisons entre deux systèmes, rapportées dans la synthèse, sont celles décrites dans la littérature.

Le lecteur trouvera, en annexe, une description du système TRANSYT ; bien que cette méthode de régulation construite des plans de feux fixes, il nous a semblé intéressant de décrire ce système car cet outil fournit les plans de feux lors de l'initialisation de SCOOT et il est très souvent utilisé comme méthode de référence lors des évaluations des systèmes adaptatifs sur site.

Bibliographie sur la génération des systèmes

- F. Dion and S. Yagar, " Real-time control of signalized networks -- Different approaches for different needs ", Road Traffic Monitoring and Control, 23-25 April 1996, Conference Publication N°422, IEE, 1994, pp 56-60.
- J.B Lesort, " Deux exemples d'expérience en vraie grandeur de régulation de la circulation urbaine ", Notes de lecture, Recherche Transport Sécurité, N°5, 1985, pp 48-50.
- J.M Thiriet and M. Robert and C. Humbert, " Cinq générations de stratégies de régulation de trafic urbain de par le monde ", TEC N°109, November-December 1991, pp 32-36.
- G. Bruno and G. Improta, " Urban Traffic Control : Current Methodologies ", Artificial Intelligence Application to Traffic Engineering, M. Bielli and G. Ambrosino Eds 1994, pp 69-93.
- Gartner and C. Stamatiadis and P.J. Tarnoff, " Development of advanced traffic signal control strategies for IVHS : a multi-level design ", Preprint N° 95-0974, Transportation Research Board, 74th Annual Meeting, January 22-28, 1995, Washington, D.C.

Chapitre I

SCOOT

1 Introduction

1.1 Le système

SCOOT - *Split Cycle and Offset Optimisation Technique* - a été développé entre 1972 et 1980 par le TRRL, Traffic and Road Research Laboratory, Grande Bretagne, en collaboration avec Ferranti, GEC et Plessey [Hunt et al., 1981], [Robertson et al., 1982] [Robertson et al., 1991]. Ses premiers essais à Glasgow et Coventry datent de 1981. Il est maintenant opérationnel dans de nombreuses villes, principalement en Grande Bretagne. On comptabilisait 53 installations opérationnelles dans ce pays en 1995 et une vingtaine dans le reste du monde dont le sultanat de Bahrain, le Canada (Toronto), le Chili (Santiago du Chili), la Chine (Pékin), Chypre, Hong Kong, les Pays Bas (Nijmegen), le Pakistan (Karachi), l'Afrique du Sud (Cape Town), l'Espagne (Madrid), la Thaïlande (Bangkok), les Etats Unis (Oxnard, Red Deer, Anaheim). Voir Figure 1.



Figure 1: Installations opérationnelles de SCOOT dans le monde

1.2 Les caractéristiques

SCOOT modifie graduellement le plan de feux en cours dans le but de s'adapter aux variations des conditions de circulation. La modification du plan de feux consiste en de petites variations de la durée du cycle, durée de vert, et décalages ; les réglages à

appliquer au niveau d'un carrefour sont tels qu'ils optimisent un indice de performance du réseau.

La plupart des décisions sont prises d'après la description actuelle des conditions de trafic. Aucune prédiction à long terme ne s'avère nécessaire car c'est l'accumulation de petites variations à très court terme qui permet l'adaptation à long terme des plans de feux à l'évolution du trafic. Le système est initialisé par un plan de feux fixe, calculé par TRANSYT (voir Annexe). Ce choix permet, dès le début de la mise en application de SCOOT, une bonne adéquation entre le plan de feux et les conditions de trafic.

Le principe de SCOOT est simple et classique pour un système adaptatif : SCOOT reçoit des mesures de trafic en temps réel du terrain. En fonction de ces informations et de la représentation du réseau urbain, un module d'écoulement du trafic prédit les retards et arrêts des véhicules correspondant à un état particulier des feux. Un module d'optimisation détermine les réglages les mieux adaptés aux conditions actuelles de circulation.

2 Modélisation du trafic

2.1 Représentation du réseau

La modélisation du réseau régulé par SCOOT est la même que celle utilisée par TRANSYT. Le réseau est représenté par un ensemble de nœuds reliés par des chaînons orientés. Un nœud est soit un carrefour à feux, soit une intersection d'artères supportant un volume de trafic suffisamment élevé mais sans feu de signalisation. Un chaînon est un courant de trafic unidirectionnel entre deux nœuds. Plusieurs chaînons peuvent figurer entre les nœuds pour représenter si nécessaire des courants de trafic séparés. Les nœuds et chaînons sont numérotés arbitrairement par les ingénieurs du trafic. Ils sont traités selon l'ordre de progression du trafic dans le réseau.

Le réseau peut être découpé en un certain nombre de zones disjointes. Un tel découpage s'appuie sur de bonnes connaissances et compréhension de l'évolution du trafic au sein du réseau. Il est évident que plus le nombre de zones, de nœuds et de chaînons considérés est élevé, plus la modélisation du réseau est fine. Il existe cependant une limitation du nombre de nœuds et chaînons qu'il est possible de traiter.

2.2 Capteurs

Les capteurs sont des boucles magnétiques localisées en début de chaque tronçon, c'est-à-dire situées en amont du carrefour à une distance variant entre 15 et 20 m. Outre le fait d'apporter une mesure du flux de véhicules, leur position sur la voirie doit permettre de :

- Détecter des remontées de files d'attente en cas de congestion.
- Prendre en compte des véhicules arrêtés sur le tronçon pour des raisons autres que des blocages, et ce afin de corriger les estimations des paramètres relatifs à l'écoulement du trafic.

L'emplacement des capteurs est un facteur primordial au bon fonctionnement et à la fiabilité du système de régulation. La distance séparant les capteurs du carrefour situé en aval varie selon la géométrie du site, la présence d'arrêts de bus, et l'emplacement de parking. En ce qui concerne la robustesse du système face aux pannes des capteurs, des études ont montré que les performances de SCOOT ne se dégradent pas en dessous des performances des systèmes de régulation à temps fixe dans le cas où 15% des détecteurs sont en panne [Robertson et al., 1991], [Martin et al., 1995].

Les données issues des capteurs (débit de véhicules, durée d'occupation temporelle) sont combinées pour former une nouvelle mesure propre à SCOOT et appelée LPU (Link Profile Unit). Cette mesure est obtenue en scrutant le capteur 4 fois par seconde et en sommant le nombre de fois que le signal issu du capteur est égal 1. Ces données LPU sont ensuite stockées sous forme d'histogrammes de flux pour permettre l'estimation des longueurs des files d'attente, des arrêts, des retards au niveau des lignes de feux. Elles sont réactualisées toutes les 4 secondes. Lorsqu'une estimation du débit en nombre de véhicules s'avère nécessaire, un facteur de conversion permet de passer du LPU au débit. Ce facteur est mesuré sur chaque tronçon. Une étude menée à Southampton montre que ce terme reste relativement stable au cours de la journée et qu'il varie en fonction de la géométrie du site. Il varie de 10.6 à 23.1 (LPU par véhicule) en fonction du tronçon sur le site de Southampton.

2.3 Modèle d'écoulement

Le modèle d'écoulement fournit une estimation, sur chaque tronçon, de la longueur courante de la file d'attente, des arrêts et des retards. Ces estimations sont calculées à partir des histogrammes de flux.

La modélisation du trafic, utilisée dans SCOOT, repose sur une approche macroscopique. Les théories macroscopiques modélisent le comportement de pelotons de véhicules. Elles sont plus grossières que les théories microscopiques, mais plus facilement utilisables.

La modélisation du trafic repose sur un modèle temps réel : les prédictions des variables utilisées par SCOOT sont réactualisées à intervalles réguliers à partir des nouvelles mesures effectuées sur le terrain (toutes les 4 secondes). C'est la première différence avec TRANSYT, reposant sur un modèle d'écoulement hors ligne.

2.3.1 Ecoulement des flux de véhicules

Histogrammes de flux

A partir des données issues des capteurs puis combinées sous forme de LPU, des histogrammes de flux de véhicules sont reconstitués sur chaque tronçon. Ils permettent de suivre l'évolution de la progression du trafic dans tout le réseau. Ils sont dits *cycliques* car ils sont entièrement réactualisés à chaque cycle de feux. Afin d'éviter la propagation d'erreur dans le calcul de la dispersion des pelotons, les dernières mesures, en provenance du terrain, sont combinées à celles en cours d'exploitation. Dans le

modèle TRANSYT, ces profils de flux sont estimés en fonction des données initiales, et sont constants d'un cycle à l'autre [Martin et al., 1995].

Analyse de l'information contenue dans les histogrammes de flux

Les histogrammes de flux présentés dans le Tableau 1 illustrent l'utilisation de l'information qui y est contenue pour déterminer les réglages optimaux de feux et leurs coordinations. Trois types d'histogramme A, B, C, caractéristiques d'une configuration particulière de trafic sont considérés. Selon le profil du flux, différents réglages des états de feux sont appliqués.

Tableau 1 - Histogrammes de flux

<p>flux</p> <p>Histogramme A</p> <p>1 cycle</p>	<p><u>Histogramme A</u></p> <p>Il est caractéristique des deux pelotons dont un particulièrement dense dans la première moitié du cycle de feux. Une bonne progression du flux est conservée si le feu reste au vert au moins pendant la première moitié du cycle de feux.</p>
<p>flux</p> <p>Histogramme B</p> <p>1 cycle</p>	<p><u>Histogramme B</u></p> <p>Aucune tendance n'est ici observée. Une coordination des feux est peu bénéfique à la progression du flux.</p>
<p>flux</p> <p>Histogramme C</p> <p>1 cycle</p>	<p><u>Histogramme C</u></p> <p>Deux pelotons se distinguent clairement. Le réglage des feux doit être tel qu'il contribue à une bonne progression de l'un ou de l'autre des pelotons.</p>

2.3.2 Prédiction de la longueur des files d'attente

Sur chaque tronçon du réseau pour lequel il existe un histogramme de flux, une estimation de la longueur de la file d'attente est fournie au niveau de la ligne de feux. Cette estimation est réalisée en fonction du temps de parcours du tronçon, du débit de saturation et de la vitesse de dégagement au niveau de la ligne de feux. On suppose que, sur chaque tronçon, la vitesse libre des véhicules est une constante préalablement fixée. Comme dans TRANSYT, il est tenu compte de la dispersion des pelotons, résultant des vitesses non homogènes des véhicules formant le peloton.

Les principes sur lesquels reposent la prédiction de la longueur de la file d'attente sont illustrés par la Figure 2 [Hunt et al., 1982]. Considérons, sur un tronçon, un capteur situé en amont de la ligne de feux et l'histogramme de flux cyclique construit à partir

des données fournies par ce même capteur. Le cycle est découpé en un certain nombre de pas de temps ; la référence à l'instant présent est notée « *Instant présent* ». Les données trafic les plus récentes correspondent donc à celles stockées dans le pas de temps précédent l'« *instant présent* ». A mesure que l'on avance dans le cycle, la référence à l'instant présent se décale vers la droite. Une fois le cycle terminé, elle est replacée en début de cycle et coïncide ainsi avec le début du nouvel histogramme de flux.

L'instant d'arrivée des véhicules comptabilisés par le capteur amont dans la file d'attente au niveau de la ligne de feux est fonction *a)* du temps de parcours du tronçon et *b)* du phénomène de dispersion des pelotons. Pendant la durée de rouge, les véhicules s'ajoutent généralement à ceux déjà présents dans la file d'attente, entraînant l'accroissement de la longueur de la file. Au cours des premières secondes du passage du feu au vert et tant que le débit de sortie n'a pas atteint le débit de saturation, la file d'attente continue à croître. Puis, elle se dissipe à un débit correspondant au débit de saturation. Une fois la file d'attente totalement dissipée, les véhicules quittent le tronçon sans retard.

La précision de la prédiction de la longueur de la file d'attente peut être remise en cause pour plusieurs raisons :

- un certain nombre de véhicules disparaissent ou apparaissent spontanément le long du tronçon à cause du stationnement par exemple,
- les véhicules quittent le tronçon à des vitesses différentes,
- un certain nombre de véhicules stationnent sur les détecteurs.

Des améliorations simples ont été apportées au modèle d'écoulement de SCOOT pour tenir compte de ces effets. Elles s'appuient sur l'interprétation du taux d'occupation temporelle des capteurs. A titre d'exemple, supposons qu'il soit possible d'estimer ou d'observer le nombre moyen de véhicules en arrêt provoquant une remontée de file au delà du capteur. On sait alors que la longueur de la file d'attente est sous-estimée si le capteur s'avère occupé avant que la prédiction de la file d'attente ait atteint le nombre moyen de véhicules en arrêt. L'occupation du carrefour aval peut aussi être utilisée pour corriger la vitesse à laquelle se décharge la file d'attente. En effet, une saturation du carrefour aval peut entraîner une modification de la valeur instantanée du débit de saturation et par conséquent conduire à une sous-estimation de la longueur de la file d'attente. (comprend pas les autres modifs !!! quelle est la référence ?)

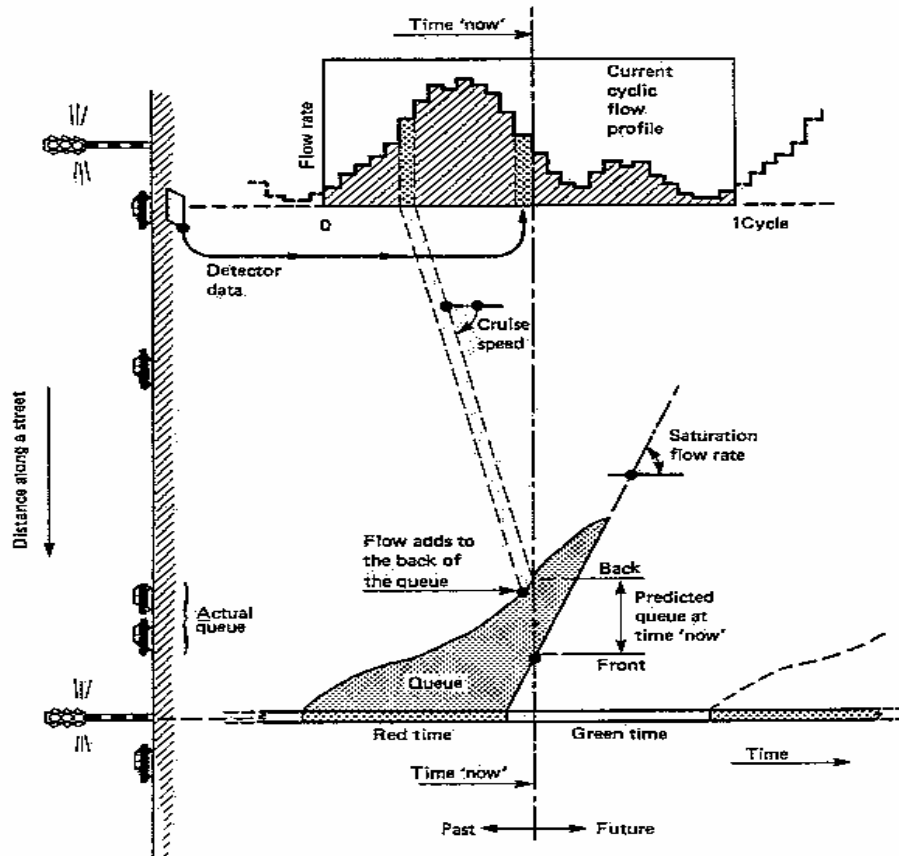


Figure 2 : Prédiction de la longueur de file d'attente

3 Méthode de régulation

3.1 Critère optimisé

L'objectif de SCOOT est de minimiser sur le réseau la somme pondérée:

- des longueurs de files d'attente sur tous les tronçons,
- du nombre d'arrêts au niveau de chacune des lignes de feux des tronçons.

Cette somme pondérée est appelée *indice de performance*. Il est aussi possible d'introduire des coefficients pondérant l'influence de certains tronçons sur le réseau tout entier.

En réalité, pour optimiser les variables des plans de feux (durée de cycle, durée de vert et décalage), d'autres critères sont considérés. L'indice de performance, calculé

uniquement sur le voisinage du carrefour considéré, n'est en effet utilisé que pour les décalages.

3.2 Optimisation

3.2.1 Détermination des durées de vert

Les modifications des durées de vert sont de deux types: *temporaire* pour suivre l'évolution aléatoire du trafic au cours de chaque cycle, ou *permanente* pour suivre l'évolution du trafic au cours du temps grâce à l'accumulation des modifications, cycle après cycle. Pour déterminer les durées de vert au niveau d'un carrefour, SCOOT s'appuie sur :

- la modélisation des files d'attente,
- l'estimation du degré de saturation. Le degré de saturation est défini comme le rapport entre le débit moyen de véhicules et le débit maximum de véhicules pouvant traverser un carrefour. Les risques de congestion sont d'autant plus forts que le degré de saturation approche 100%.

Quelques secondes avant l'instant prévu du changement de phase, SCOOT estime s'il est préférable d'effectuer le changement à l'instant prévu, avant ou après l'instant prévu. Le changement peut atteindre ± 4 secondes par rapport à l'instant prévu. SCOOT sélectionne l'option qui permet d'atteindre 90% du degré de saturation, avec la contrainte de 4 secondes. Ceci correspond à la modification temporaire de la durée de vert dans le but de suivre l'évolution aléatoire du trafic. Un ajustement permanent de ± 1 seconde de l'instant prévu de changement de phase est autorisé pour suivre l'évolution du trafic. Les décisions de commutation sont prises au niveau de chaque carrefour, indépendamment les unes des autres.

3.2.2 Détermination des décalages

L'information contenue dans les histogrammes de flux est utilisée pour déterminer si une modification des décalages améliore la progression du trafic sur les tronçons en amont et en aval dudit carrefour. Pour cela, une fois par cycle, on compare la valeur de l'indice de performance sommé sur tous les tronçons adjacents au carrefour considéré, pour le décalage prévu et pour des décalages légèrement inférieurs ou supérieurs. Le décalage correspondant au minimum de l'indice de performance est alors adopté. Le décalage peut avoir lieu 4 secondes avant l'instant prévu de commutation de l'état de feux, à l'instant prévu ou 4 secondes après l'instant prévu. Cette modification conduit à décaler toutes les dates de commutation des états de feux. L'optimisation des décalages se fait pour chaque carrefour une seule fois dans le cycle.

3.2.3 Détermination de la durée du cycle

La fréquence des changements de la durée de cycle est d'une fois toutes les 2,5 minutes voire même toutes les 5 minutes. A chaque changement, la durée du cycle ne peut varier que de 4 ou 8 secondes. SCOOT détermine la durée de cycle en fonction de l'estimation du degré de saturation. Des contraintes de durées minimale et maximale sont à respecter.

Fonctionnement sur un cycle

Tous les carrefours appartenant à une même zone fonctionnent sur une durée de cycle identique, et ce dans le but de maintenir une certaine coordination. C'est ce qu'on appelle le *fonctionnement sur un cycle*. La durée d'un cycle, caractéristique d'une même zone, est contrainte par des bornes minimales, variant entre 30 et 40 secondes, et maximales, variant entre 90 et 120 secondes. Elle est modifiée indépendamment des durées de cycle des autres zones.

La durée de cycle d'une zone est modifiée de manière à ce que le carrefour le plus dense de la zone ait un degré de saturation proche de 90%. Le degré de saturation influe sur le choix de la durée de cycle, et le temps de vert effectif. Ainsi,

- si le degré de saturation est inférieur à 90%, alors la durée du cycle est réduite. Il faut prendre en compte le fait que la diminution de la durée du cycle entraîne une diminution de la capacité de l'axe.
- si le degré de saturation est supérieur à 90%, alors la durée de cycle est augmentée, ainsi la capacité est augmentée.

En règle générale, lorsque la demande est faible, la durée des cycles doit être courte. Pour des périodes de fort trafic, la durée des cycles doit être augmentée.

Fonctionnement sur un demi-cycle

Il est possible de faire fonctionner certains carrefours d'une même zone sur une moitié de durée de cycle. Un tel fonctionnement introduit des discontinuités dans le traitement du trafic; les changements liés au passage d'un fonctionnement basé sur un cycle à un fonctionnement basé sur un demi-cycle sont brutaux. Il n'est mis en œuvre que s'il entraîne une nette diminution des temps de parcours et des retards dans la zone.

4 Evaluation

4.1 Comparaison avec TRANSYT

Les stratégies de régulation offertes par les systèmes TRANSYT et SCOOT sont très similaires. En théorie, toutes deux cherchent à déterminer les réglages optimaux des feux tricolores au sens d'un indice de performance calculé en fonction des longueurs de files d'attente et du nombre d'arrêts observés sur un réseau de carrefours. En réalité, seul TRANSYT s'appuie sur l'indice de performance pour déterminer les durées de vert et décalages, considérant la durée de cycle comme constante. SCOOT s'appuie sur d'autres critères (conduisant indirectement à la minimisation de l'indice de performance) pour en déduire, une fois par cycle, les durées de cycle, durées de vert et décalages optimaux.

TRANSYT et SCOOT ont recours à des modèles d'écoulement du trafic très similaires qui leur permettent de prédire les longueurs des files d'attente au niveau de la ligne de feux de chacun des tronçons du réseau. Ils s'appuient tous deux sur des histogrammes de flux. Dans TRANSYT, la demande aux entrées du réseau étant considérée constante tout au long de la simulation, les histogrammes de flux sont par

conséquent fixes. SCOOT utilise des détecteurs situés en amont de chaque ligne de feux pour mesurer les valeurs de débit et de taux d'occupation temporelle, nécessaires à la construction des histogrammes de flux. Une partie des histogrammes est réactualisée toutes les 4 secondes, permettant une évolution en temps réel des plans de feux. Pour déterminer la longueur de la file d'attente au niveau de la ligne de feux, les modèles d'écoulement de TRANSYT et SCOOT supposent connues et constantes les variables de trafic suivantes: la vitesse libre et le débit de saturation. Notons que la version 2.4 de SCOOT offre aux utilisateurs la possibilité d'une estimation automatique du débit de saturation, à l'aide d'un capteur placé au niveau de la ligne de feux. Dans SCOOT, les longueurs de file d'attente sont réactualisées toutes les 4 secondes.

4.2 Précision des estimations

Des expérimentations ont été menées à Southampton dans le but d'évaluer la précision des estimations des profils de débit, longueurs de files d'attente, retards et nombres d'arrêts ; les données mesurées sur site sont comparées à celles fournies par le modèle d'écoulement de SCOOT. Un pré-traitement des données réelles a été effectué pour supprimer toutes les conditions atypiques de trafic telles que celles résultant d'incidents ou d'accidents.

Le réseau comprend 50 carrefours. Pendant la durée de l'évaluation, les feux tricolores sont contrôlés par un système à temps fixe. Bien que SCOOT ait déjà été installé en 1983, une nouvelle phase de calibrage des paramètres tels que le temps de parcours, la longueur maximale de la file d'attente, le débit de saturation s'est avérée nécessaire sur les tronçons concernés. Les résultats de cette étude mettent en évidence [Carden et al., 1988]:

- Une sous-estimation de l'ordre de 2 LPU/sec du débit de saturation, de fortes erreurs (soit environ 20%) en terme de prédiction des retards, et longueur maximale de la file d'attente.
- la sur-estimation de 5% des retards par véhicule, en moyenne, sur tout le réseau. En congestion, la sur-estimation des retards est multipliée par un facteur 3 en moyenne, par rapport aux conditions fluides.
- la sous-estimation de 24% du nombre d'arrêts, en moyenne sur tout le réseau. Cette sous-estimation résulte d'une sous-estimation du même ordre de grandeur du débit de saturation. Elle correspond, en terme d'arrêts par véhicule, à une sous-estimation de 6%.

4.3 Evaluation des performances de SCOOT

Les performances de SCOOT ont été évaluées dans les cinq villes britanniques suivantes: Glasgow, Coventry, Worcester, Londres et Southampton [Hunt et al., 1982], [Mac Donald et al., 1991]. La première campagne d'évaluation de SCOOT a été menée à Glasgow au printemps 1979. Elle repose sur un réseau de 140 carrefours situés dans le centre ville ; le réseau comprend des artères à sens unique et double sens. La régulation par SCOOT est appliquée à 40 feux de signalisation. La distance moyenne entre carrefours est de 100 m. La comparaison s'appuie sur des plans de feux fixes, optimisés

par TRANSYT. En moyenne sur une journée, SCOOT entraîne une réduction de 6% des temps de parcours et de 12% des retards. L'efficacité de SCOOT varie considérablement au cours de la journée, comme le montrent les résultats synthétisés dans le Tableau 2. Notons les contre-performances de SCOOT pendant la période de pointe du matin à Glasgow.

Tableau 2 - Récapitulatif des performances de SCOOT

Site	Stratégie de régulation existante	Variation en % des temps de parcours et retards		
		Période de pointe du matin	Période creuse	Période de pointe du soir
Glasgow	Temps fixe (Transyt)	-1 / -2	7* / 14*	6* / 10*
Coventry, Foleshill	Temps fixe (Transyt)	5 / 23	4* / 33*	8* / 22*
Coventry, Spon End	Temps fixe (Transyt)	2 / 8	0 / 0	2 / 4
Worcester	Temps fixe (Transyt)	4 / 7	3 / 8	11 / 20
Worcester	Isolé, micro-régulation	18 / 31	7 / 18	13 / 20
Londres	Temps fixe (Transyt)	5 / non fourni	13 / non fourni	5 / non fourni
Southampton	Isolé, micro-régulation	18 / 40*	0 / 1	26 / 48*

* résultat significatif à 95%

Au printemps 1980, SCOOT est installé à Coventry et évalué pendant 5 semaines sur deux réseaux distincts. Dans les deux cas, SCOOT est comparé à une stratégie de régulation basée sur des plans de feux fixes optimisés par TRANSYT. Le premier réseau de Foleshill Road comprend une artère principale à double sens, située entre des zones industrielle et résidentielle. La distance entre carrefours est de 300 m. En moyenne par jour, SCOOT entraîne une réduction de 5,5% des temps de parcours, ce qui correspond à une réduction de 27% des retards. Les résultats plus détaillés de cette évaluation sont présentés dans le Tableau 2.

Le second réseau sur lequel SCOOT est évalué à Coventry est celui de Spon End. Spon End est un réseau d'axes situés dans la partie résidentielle. Il est caractérisé par :

- Un trafic faible en dehors des périodes de pointe,
- Une congestion récurrente apparaissant sur deux ou trois carrefours identifiés, pendant les périodes de pointe.

La distance entre carrefours est de 500 m. Une étude comparative par rapport à TRANSYT a montré la similitude des performances des deux systèmes. Voir Tableau 2.

L'analyse globale des résultats de l'évaluation de SCOOT montre que les performances varient en fonction des sites et des tranches horaires. Des réductions moyennes de l'ordre de 12% et 40% des retards par rapport, d'une part à des stratégies de régulation par plans de feux fixes et d'autre part à des stratégies de micro-régulation se trouvent communément dans la littérature. La réduction des temps de parcours et

retards liée à l'application de SCOOT entraîne également la diminution du nombre des arrêts, de la consommation de carburant et de la pollution.

Une campagne d'évaluation des performances de SCOOT à Toronto, Canada, a été menée pendant une période de 6 semaines entre mai et juin 1993 par Metro Transportation (responsable de la gestion du trafic dans la ville de Toronto), en collaboration avec Siemens Traffic Controls et Fortran Traffic Systems [Siemens Automotive, 1995]. Les performances de SCOOT sont comparées à celles d'un système de régulation par plans de feux fixes, réactualisés tous les cinq ans. Elles sont résumées dans le Tableau 3. Face à ces résultats encourageants, le Metro Transportation a décidé de poursuivre l'installation de SCOOT à Toronto.

Tableau 3 : Performances de SCOOT à Toronto

Variable de trafic observée	Gain lié à SCOOT (par rapport à une stratégie à plans de feux fixe)
Temps de parcours	Réduction de 8%
Nombre d'arrêts	Réduction de 22%
Retards	Réduction de 17%
Consommation de carburant	Réduction de 5.7%
Emission	Réduction de 8% de HO Réduction de 5.0% de CO

5 Derniers développements

De nombreuses versions de SCOOT ont vu le jour depuis sa création au début des années 1970. Elles incluent diverses fonctions qui font maintenant de SCOOT un véritable outil intégré de gestion du trafic [Bretherton et al., 1995], [Bowen et al., 1996].

Base de données trafic ASTRID [Hounsell et al., 1990]

Le modèle d'écoulement de SCOOT fournit en temps réel une grande quantité d'informations trafic telles que les retards, nombres d'arrêts, débits, longueurs de file d'attente, niveaux de congestion, capacités disponibles, états des feux. Ces informations, riches par leur précision, quantité et qualité, sont d'un intérêt indéniable. Elles peuvent s'avérer particulièrement utiles:

- En tant que références dans des études d'impacts.
- Pour améliorer la connaissance des phénomènes de congestion et de propagation.
- Pour déterminer les caractéristiques géométriques des carrefours et tronçons.
- Pour les fonctions de guidage et de détections d'incidents.

La base de données ASTRID (Automatic Scoot Traffic Information Database) a donc été développée par le TRL pour la gestion de ces informations [Hounsell et al., 1990].

Détection des incidents INGRID

INGRID (Integrated Incident Detection) est un système temps-réel de détection des incidents en milieu urbain [Bowen, Bretherton, 1996]. Il s'appuie sur les détecteurs utilisés par la stratégie de commande des feux mise en oeuvre par SCOOT, mais fonctionne indépendamment de SCOOT. La détection repose sur les valeurs des taux d'occupation et des débits recueillies une fois par cycle. Deux algorithmes de détection ont été implémentés ; le premier recherche un changement brutal dans les valeurs des taux d'occupation et des débits, le second compare les valeurs actuelles des taux d'occupation et des débits aux valeurs historiques stockées dans ASTRID. La présence d'un incident est détectée et localisée entre deux capteurs lorsque *a)* le taux d'occupation et le débit mesurés au droit du capteur aval diminuent en dessous d'un certain seuil, et *b)* le taux d'occupation et le débit mesurés au droit du capteur amont augmentent au-delà d'un certain seuil. Un indice est ensuite calculé décrivant la sévérité de l'incident. Un indice de confiance est aussi estimé en fonction du nombre de capteurs affectés par l'incident, de la durée de l'incident et du nombre d'algorithmes de détection confirmant la présence d'un incident.

Gestion de la congestion

SCOOT offre la possibilité aux opérateurs de définir des critères de congestion et ainsi d'identifier rapidement les zones critiques du réseau. Il est ensuite possible de mettre en oeuvre des techniques de régulation par « gating » de manière à protéger les zones sensibles.

Les développements actuels concernant la maîtrise de la congestion incluent :

- l'échange d'informations entre carrefours voisins. Lors de l'optimisation du fonctionnement local d'un carrefour, il est possible d'inclure des informations relatives au fonctionnement des carrefours voisins, et de transmettre des informations aux carrefours intéressés.
- La régulation par « gating ». Elle a pour objectif de limiter l'accès à des zones jugées sensibles et ainsi éviter l'apparition de congestion dans ces zones critiques. Elle s'appuie sur la définition de tronçons critiques et tronçons de stockage ; les tronçons de stockage sont désignés pour accueillir temporairement l'excédent de véhicules qui, sans action de régulation, conduirait à la saturation des tronçons critiques. Une fois déclenchée, la régulation par « gating » consiste à réduire la durée de vert des tronçons de stockage. Son implémentation nécessite la mise en oeuvre d'actions à distance, i.e., modifier les plans de feux de carrefours situés en dehors de la zone de contrôle immédiate.
- Estimation de la qualité de l'air et de l'émission de polluants [Bretherton, Wood, Bowen, 1998]
- Priorité aux véhicules de transport en commun. Ce module s'appuie sur la détection des bus soit par des capteurs sélectifs implantés à des emplacements stratégiques, soit par des outils de détection automatique. La priorité aux bus est accordée soit grâce à une augmentation de la durée de vert soit par une modification de l'enchaînement des phases. Elle dépend du degré de saturation du carrefour. Les principes de cette stratégie sont détaillés dans [Bowen et al., 1996]. L'évaluation de ce module a eu lieu à Londres sur Edgware Road et Camden

Town. La détection des bus y est réalisée de manière automatique. Une réduction moyenne de 3 à 8 secondes des arrêts par ligne de bus et par bus a été observée. L'augmentation de la durée de vert a conduit à une réduction supplémentaire de 2 secondes des retards. Le retard occasionné engendré aux autres types de véhicule s'est avéré faible quand le degré de saturation est proche de 50%. Les résultats de l'évaluation sont détaillés dans [Hounsell, Leod, Bretherton, Bowen, 1996].

6 Récapitulatif des caractéristiques

Pays de développement	Grande Bretagne: TRRL
Zone sous contrôle	Réseau décrit par un ensemble de chaînons et de nœuds Définition de plusieurs zones disjointes
Type de modélisation du trafic	<u>Macroscopique</u> : gestion de files d'attente verticales
Origine des données de trafic	<u>En ligne</u> : capteurs, de type boucle magnétique, implantés au début de chaque chaînon
Définition de l'indice de performance	Somme pondérée des files d'attente et nombre total d'arrêts sur tous les chaînons du réseau
Estimation/Prédiction des files d'attente verticales	Combinaison des données issues des capteurs pour former le LPU (Link Profile Unit). Puis, stockage des LPU sous forme d'histogrammes de flux, réactualisation des histogrammes de flux, à chaque pas de temps, en fonction des mesures fournies par les capteurs en amont de la ligne de feux. Puis, calcul des longueurs de files d'attente.
Technique d'adaptation au trafic	Modulation en continu du plan de feux en cours
Paramètres optimisés	Durées de vert, décalages, durée de cycle
Durée de cycle	Constante par zone ou la moitié de cette constante
Fréquence d'optimisation	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Durée de vert</u>: à chaque changement de phase • <u>Décalages</u>: une fois par cycle • <u>Durée de cycle</u>: toutes les 2,5 minutes voire 5 minutes
Architecture de commande	<u>Partiellement décentralisée</u> : les réglages à chaque carrefour à feux sont déterminés, indépendamment les uns des autres, selon un critère de performance global.

7 Récapitulatif des variables de trafic utilisées par SCOOT

Capteurs	Boucles magnétiques implantées en amont des lignes de feux
Variables mesurées en temps réel par les capteurs	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Débit entrant</u> rôle: contribue au calcul des LPU pour l'estimation des arrivées sur le tronçon. • <u>Taux d'occupation temporelle</u> rôle: contribue au calcul des LPU pour l'estimation des arrivées sur le tronçon
Fréquence des mesures	Mesure en temps réel, toutes les 0,25 secondes, des débits et taux d'occupation. Les histogrammes sont réactualisés toutes les 4 secondes
Caractéristiques de l'écoulement du trafic mesurées puis figées	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Longueur maximale des files d'attente</u> • <u>Temps de parcours des tronçons</u> rôle: modélisation du nombre d'arrêts, retards, longueur de la file d'attente • <u>Pourcentage des mouvements tournants</u> rôle: modélisation des arrivées sur les tronçons internes au réseau • <u>Débit de saturation</u> rôle: modélisation de l'écoulement des véhicules sortant d'un tronçon.
Variables reconstruites	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Degré de saturation</u> : rapport entre le flux moyen de véhicules et le flux maximum de véhicules, pouvant traverser un carrefour. rôle: détermination des durées de vert et de cycle • <u>Histogramme de propagation du flux de véhicules</u> sur chaque tronçon jusqu'à la ligne de feux, en fonction des vitesses de parcours du tronçon, du coefficient de dispersion, et des débits entrants et des LPU. rôle: détermination des variables modélisées. fréquence de calcul: à chaque cycle.

Variables modélisées	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Débit sortant</u>, en fonction des états des feux, de la file d'attente, du débit de saturation. rôle: calcul de la longueur de la file d'attente. • <u>Arrivées dans la file d'attente</u> rôle: calcul de la longueur de la file d'attente. • <u>Estimation de la longueur de la file d'attente verticale sur un tronçon</u> rôle: Calcul du degré de saturation. fréquence de calcul: toutes les 4 secondes • <u>Calcul de la position du dernier véhicule de la file d'attente</u> • <u>Estimation du nombre de véhicules qui devraient s'arrêter</u> fréquence de calcul: toutes les 4 secondes rôle: influence le calcul de l'indice de performance. • <u>Prédiction des retards à partir de la file d'attente</u> rôle: calcul de l'indice de performance
Variables de commande	<p>Par zone:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <u>Durée de vert</u> : modification de quelques secondes avant la fin de la durée déterminée • <u>Décalage</u> : modification de quelques secondes, une fois par cycle • <u>Durée de cycle</u> : modification de quelques secondes, à la fréquence d'au moins 2,5 minutes. Durée min: 30 s - 40 s / durée max : 90 s - 120 s
Indice de performance	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Objectif principal</u> : minimiser l'indice de performance sur le réseau • <u>Indice de performance</u> : somme pondérée par cycle sur tout le réseau de la valeur moyenne de la somme des files d'attente sur tous les tronçons et du nombre d'arrêts au niveau de chacune des lignes de feux des tronçons

Variables de trafic en sortie de SCOOT

Le tableau 4 récapitule les principales variables relatives à l'écoulement du trafic et fournies par le modèle d'écoulement interne à SCOOT [Bretherton et al., 1998].

Tableau 4 : Récapitulatif des principales variables de trafic disponibles par le modèle d'écoulement interne à SCOOT

Variable trafic	Unités	Disponible au niveau	Fréquence de disponibilité
Débit	Veh/h	tronçon, nœud, zone	Toutes les 2,5/5 min ou une fois par cycle
Retard	Veh.h/h	tronçon nœud, zone	Toutes les 2,5/5 min
Arrêt	Veh/h	tronçon, nœud, zone	Toutes les 2,5/5 min
Indicateur de congestion	Intervalle/h	tronçon	Toutes les 2,5/5 min
Longueur de file d'attente	veh	tronçon	Une fois par cycle
Temps de décharge de la file d'attente	sec	tronçon	Une fois par cycle
Indice de performance		Tronçon/nœud	

8 Bibliographie

- Bing (B.), Carter (A.), SCOOT – The World's Foremost Adaptive Traffic Control System, The Annual Review of Traffic Engineering and Advanced Traffic Management Systems.
- Bowen (G.T.), Bretherton (R.D.), J.R Landles, D.J Cook – Active Bus Priority in SCOOT. *Road Traffic Monitoring and Control*, 26-28 April 1994, IEE, pp 73-76.
- Bowen (G.T.), Bretherton (R.D.). - Latest Developments in SCOOT - Version 3.1. *Road Traffic Monitoring and Control*, April 23-25, 1996, Conference Publication N°422, IEE, pp 61-65.
- Bretherton (R.D.). - SCOOT Urban Traffic Control System: Philosophy and Evaluation. *IFAC Symposium on Control Communications in Transportation*, September 1989, pp 491-498.
- Bretherton (R.D.), Bowen (G.T.). – Recent Enhancements to SCOOT – SCOOT Version 2. 4. *Road Traffic Monitoring and Control*, April 1990, IEE, pp 95-98.

- Bretherton (R.D.), Wood (K.), Bowen (G.T.). – SCOOT Version 4. *Traffic Engineering & Control*, July/August 1998, pp 425-427.
- Bretherton (R.D.), Wood (K.), Baker (K.), Radia (B.) – Congestion and Incident Management Using the SCOOT UTC System - *Road Traffic Monitoring and Control*, April 2000, Conference Publication N°472, IEE, pp 96-100.
- Bretherton (R.D.). - SCOOT: Current developments, *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems*, Yokohama, Japan, November 9-11 1995, Volume I, pp 364-368.
- Carden (P.), Hounsell (N.B), Bretherton (R.D) – SCOOT Model Accuracy, PTRC Summer Annual Meeting, 1988.
- Carden (P.), McDonald (M.). – The Application of SCOOT Control to an Isolated Intersection, *Traffic Engineering and Control*, June 1985, pp 304-310.
- Fox (K.), Clark (S.), Boddy (R.), Montgomery (F.), Bell (M.).- Some Benefits of a SCOOT UTC system. , *Traffic Engineering & Control*, September 1998, pp 484-489.
- Fox (K.), Balmforth (P.), Franklin (P.), Montgomery (F.), Siu (Y.L.), Integrated ATT Strategies for Urban Arterials: Drive II Project PRIMAVERA – The Dewsbury Road Experiment, *Traffic Engineering & Control*, July/August 1995, pp 427-431.
- Fox (K.), Montgomery (F.), Sheperd (S.), Smith (C.), Jones (S.), Biora (F.), Integrated ATT Strategies for Urban Arterials: Drive II Project PRIMAVERA – Bus Priority in SCOOT and SPOT using TIRIS, *Traffic Engineering & Control*, June 1995, pp 356-361.
- Hounsell (N.B.), McLeod (F.N.), Burton (P.). – SCOOT: A Traffic Database. *Third International Conference on Road Traffic Control*, IEE Publication N°320, May 1990, pp 99-103.
- Hounsell (N.B), McLeod (F.N.), Bretherton (R.D.), Bowen (G.T.). - PROMPT: Field Trial and Simulation Results of Bus Priority in SCOOT, *Road Traffic Monitoring and Control*, April 23-25, 1996, Conference Publication N°422, IEE, pp 90-94.
- Hunt (P.B.), Robertson (D.I.), Bretherton (R.D.), Winton (R.D.). - SCOOT, A Traffic Responsive Method of Co-Ordinating Signals. *TRRL Laboratory Report 1014*, 1981.
- Hunt (P.B.), Robertson (D.I.), Bretherton (R.D.), The SCOOT on-line Traffic Signal Optimisation Technique, *Traffic Engineering & Control*, April 1982, pp 190-192.
- Luk (J.Y). - Two traffic responsive Area Traffic Control methods: SCAT and SCOOT. *Traffic Engineering and Control*, Vol.25, No.1; Jan. 1984; pp14-22.
- McDonald (M.), Hounsell (N.B), Road Traffic Control: TRANSYT and SCOOT, In *Concise Encyclopedia of Traffic & Transportation Systems*, Papageorgiou Editor, Pergamon Press, 1991, pp 400-408.

- Martin (P.T.), Hockaday (S.L.). - SCOOT – An Update. *Institute of Transportation Engineers Journal*, January 1995, pp 44-48.
- Middelhma (F.), Taale (H.), Dibbits (J.), Fransen (W.), The Assessment of the SCOOT System in Nijmegen, *Road Traffic Monitoring and Control*, April 23-25, 1996, Conference Publication N°422, IEE, pp 66-70.
- Moore (J.E), Jayakrishnan (R.), McNally (M.G.), MacCarley (C.A.). – *SCOOT Performance in Anaheim Advanced Traffic Control System*, Intellimotion, Vol. 8, N° 3, 1999.
- Peck (C.), Gorton (P.T.W.), Liren (D.). – The Application of SCOOT in Developing Countries, *Third International Conference on Road Traffic Control*, IEE Publication N°320, May 1990, pp 104-109.
- Robertson (D.I.), Hunt (P.B.), A Method of Estimating the Benefits of Co-ordinating Signals by TRANSYT and SCOOT, *Traffic Engineering & Control*, November 1982, pp 527-531.
- Robertson (D.I.), Bretherton (R.D.). - Optimising Networks of Traffic Signals in Real-Time: The SCOOT method. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40 n°1, February 1991, pp 11-15.
- Siemens Automotive USA. – SCOOT in Toronto. *Traffic Technology International*, Spring 1995, pp 28-30.
- Tarry (S.), Graham (A.), The Role of Evaluation in ATT Development – Evaluation of ATT systems, *Traffic Engineering & Control*, December 1995, pp 688-691.

Chapitre II

SCATS

1 Introduction

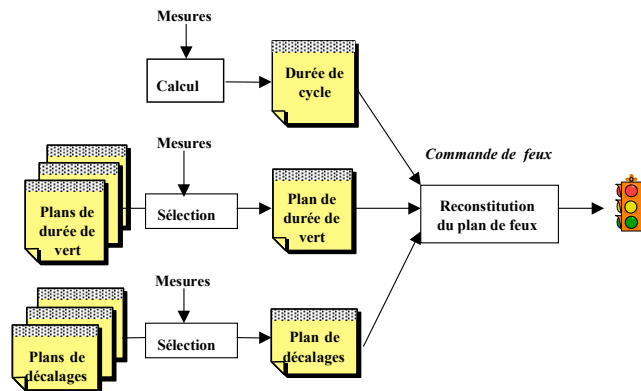
1.1 Le système

SCATS - *Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System* - a été développé, dans les années 1980, par le département Transport de Nouvelles Galles du Sud, Australie, en réponse à un besoin de nouveaux algorithmes de gestion dynamique de trafic pour la ville de Sydney. Depuis les années 1990, SCATS régule le trafic dans la plupart des grandes villes australiennes comptant plus de 10 millions d'habitants, dont Melbourne, Perth, Adélaïde, Canberra, Hobart et Darwin. La version opérationnelle de SCATS à Sydney offre la possibilité d'intégrer des priorités aux autobus. Celle opérationnelle à Melbourne inclut aussi les tramways. SCATS est aussi présent sur le marché international : en Asie du Sud Est (Shanghai, Tianjin, Hong-Kong et Singapour), Nouvelle Zélande, en Europe (Dublin), aux USA (Oakland) dans le cadre du projet FAST-TRAC de guidage par balises, en Orient (Arabie Saoudite et Turquie).

1.2 Les caractéristiques

Cette stratégie s'appuie sur des bibliothèques séparées de durées de cycle, de décalages et de durées de vert et sur un algorithme temps réel de reconstitution du plan de feu. Le plan de feu est ainsi reconstitué et non stocké tel quel dans une bibliothèque (Cf. Figure 3).

Figure 3 : Principes généraux de SCATS



Ce système de régulation ne comprend pas de module d'écoulement du trafic : son fonctionnement ne repose que sur la disponibilité de données explicites décrivant le trafic. L'objectif général est de minimiser les retards et les arrêts par choix des paramètres de base du système de régulation du trafic, tels que la durée de vert, les décalages et la durée de cycle. La régulation se décompose en deux niveaux : une régulation stratégique sur des ensembles de carrefours et une régulation tactique au niveau de chaque carrefour.

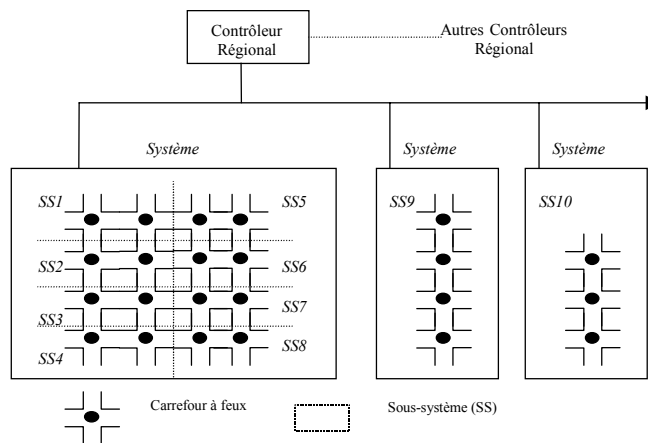
2 Modélisation du trafic

2.1 Représentation du réseau

Un réseau de carrefours régulé par SCATS est divisé en un ensemble de *régions* regroupant chacune jusqu'à deux cents contrôleurs de carrefour. Chaque région est découpée en *systèmes* composés de *sous-systèmes* regroupant des carrefours voisins présentant de fortes interactions. (Cf. Figure 4). Les sous-systèmes sont construits de manière à ne contenir qu'un seul carrefour jugé *critique*.

A titre d'exemple, la version de SCATS opérationnelle à Sydney gère 2500 carrefours, regroupés en 28 régions, chacune de ces régions pouvant compter de 40 à 128 carrefours. A Perth, SCATS gère 520 des 610 carrefours à feux existants.

Figure 4 : Représentation du réseau régulé par SCATS



2.2 Capteurs

Les capteurs utilisés sont des boucles magnétiques implantées au niveau de chacune des lignes de feux. Ils ont pour fonction de fournir des informations concernant le flux de trafic pour les régulations stratégique et tactique. Les capteurs stratégiques, dont les mesures sont utilisées pour la mise en œuvre de la régulation stratégique, fournissent au

contrôleur régional le nombre de véhicules comptabilisés et le temps d'occupation pendant la durée de vert. Ces informations permettent de déterminer, pour le prochain cycle de feux, les plans de phases, les décalages internes et externes à chaque sous-système, la longueur du cycle à appliquer aux sous-systèmes. A titre d'exemple, la régulation de trafic mise en œuvre à Sydney repose sur des données trafic recueillies par 25 000 boucles.

2.3 Modèle d'écoulement

Ce système de régulation ne comprend pas de modèle d'écoulement du trafic: son fonctionnement ne repose que sur la disponibilité de données explicites décrivant le trafic.

3 Méthode de régulation

3.1 Hiérarchie de la régulation

Deux niveaux de régulation sont à distinguer : le niveau *stratégique* et le niveau *tactique*.

La régulation stratégique est l'élément de base de la régulation développée par SCATS, au niveau des sous-systèmes. Elle consiste à sélectionner, en réponse à des variations détectées de la demande et de la capacité, les durées de vert, les décalages et les durées de cycle adéquates pour chacun des sous-systèmes et les décalages à appliquer entre les sous-systèmes.

La régulation tactique n'est en fait qu'une politique de micro-régulation, appliquée localement au niveau de chaque carrefour.

3.2 Régulation stratégique

3.2.1 Bibliothèques de plans de feux

L'élaboration des bibliothèques de plans de feux s'appuie sur divers critères d'optimisation différents selon les modes de circulation :

- Circulation de nuit : minimisation des arrêts,
- Circulation aisée : minimisation des temps de parcours,
- Périodes de pointe : maximisation des débits,
- Congestion : retard de l'apparition de la congestion. Lorsque la congestion est établie, la régulation consiste à gérer les files d'attente aux carrefours critiques.

SCATS reconstruit le plan de feux adapté aux conditions observées de trafic à partir de durées de vert, de décalages internes (à l'intérieur d'un même sous-système) et externes à un sous-système (ayant pour objectif la coordination entre sous-systèmes adjacents) préétablis et stockés dans des bibliothèques. Ces bibliothèques sont :

- *Bibliothèques de durées de vert.* Quatre plans de base de durées de vert sont fournis pour chacun des carrefours. La sélection est effectuée au niveau du sous système en fonction des exigences du carrefour critique.
- *Bibliothèques de décalages internes* pour chacun des carrefours d'un sous-système.
- *Bibliothèques de décalages externes* appliqués pour coordonner des sous-systèmes adjacents.

3.2.2 Détermination du plan de feux optimal

Le paramètre le plus important et sur lequel repose la régulation mise en œuvre par SCATS est analogue au degré de saturation. Il est défini comme le rapport des durées de vert utile et totale, et noté DS ; la durée de vert utile est la durée de vert effectivement utilisée par les véhicules. Le degré DS est calculé une fois par cycle sur chaque tronçon.

L'information stratégique provenant des capteurs stratégiques est utilisée par l'algorithme d'optimisation pour déterminer, cycle après cycle, les paramètres de régulation minimisant le degré de saturation. SCATS détermine tout d'abord la durée du cycle de chacun des sous-systèmes. La durée du cycle est ensuite partagée entre les différentes phases de chacun des carrefours. Les plans de décalage internes à un sous système sont sélectionnés. Les plans de décalages externes, entre deux sous-systèmes adjacents, sont ensuite déterminés.

3.2.3 Calcul de la durée de cycle

Tous les carrefours au sein d'un même sous-système fonctionnent sur une durée de cycle identique. Cette durée est une fonction de la valeur du degré de saturation mesuré au cours du cycle de feux précédent. Les modifications apportées à la durée de cycle, d'un cycle à l'autre, ne doivent pas excéder 6 secondes. La durée de cycle à appliquer au prochain cycle de feux est définie par

$C' = C + 60 (DS - f(C))$, avec C' la nouvelle durée de cycle et C son ancienne valeur.

Pour chaque sous-système, la durée du cycle est contrainte par les quatre valeurs suivantes : la durée minimale C_{min} , la durée maximale C_{max} , une valeur moyenne C_s conduisant à une bonne coordination dans le sous-système, une valeur C_x au-dessus de laquelle toute durée de cycle supplémentaire est attribuée à une phase prédéterminée qu'on désignera par phase *nominale* ; ceci signifie qu'on tente d'écouler le trafic sur un mouvement particulier, en accordant une durée de vert plus importante à la phase correspondante. La longueur de cycle peut varier de C_s à C_{max} en fonction de la valeur de C . Néanmoins quand le débit mesuré par les capteurs stratégiques est inférieur à un seuil fixé, la longueur de cycle est fixée à C_{min} .

3.2.4 Calcul de la durée de vert

Les plans de durée de vert déterminent la durée de vert allouée à chacune des phases du carrefour. Quatre plans de durée de vert prédéterminés pour chaque carrefour sont stockés dans la bibliothèque correspondante. Les durées de vert sont exprimées en pourcentage de la durée de cycle pour la phase nominale et en secondes ou, si on le souhaite, en pourcentage pour les autres phases. La durée de vert varie par modification de la longueur du cycle. Ainsi, lorsque la longueur augmente, les phases dont la durée de vert est exprimée en secondes se voient affecter une proportion réduite de la

longueur du cycle, les phases dont la durée de vert est un pourcentage de la longueur du cycle et la phase nominale se voient affecter une proportion constante de la longueur de cycle tant que la longueur de cycle est inférieure à C_x . Au-dessus de ce seuil, toute durée de cycle additionnelle est attribuée à la phase nominale.

Une fois par cycle, un vote permettant la sélection du plan de durée de vert a lieu. La procédure de vote est décomposée comme suit :

1) Pour chacun des tronçons de la sous-zone, et pour chacune des durées de vert, on calcule une nouvelle valeur du degré de saturation noté DS' par la relation

$$DS' = DS * \frac{\text{durée de vert du plan en simulation}}{\text{durée de vert du plan en cours}}$$

2) A chacun des quatre plans de durée de vert, on associe la valeur maximale des DS' calculés sur tous les tronçons de la sous-zone.

3) Parmi les quatre valeurs des DS' obtenues à l'étape 2, on ne retient que la valeur minimale.

4) Le plan sélectionné deux fois en trois cycles consécutifs est appliqué. Puis la durée est calculée.

3.2.5 Calcul des décalages

Cinq plans de décalages internes - à l'intérieur d'un même sous-système - sont disponibles. Ils ont pour objectif de coordonner les changements des états de feux des carrefours adjacents d'un même sous-système. Les décalages entre sous-systèmes sont définis par cinq plans de décalages externes. Ils ont pour objectif la coordination entre sous-systèmes adjacents.

La durée d'un décalage, exprimée en secondes, est par conséquent indépendante de la longueur du cycle. Elle peut cependant être modifiée en fonction de la longueur du cycle, en conditions denses de trafic. Généralement, deux des cinq plans de décalage sont optimaux en conditions de trafic denses, telles que, par exemple, les heures de pointe du matin et du soir.

Parmi les cinq plans de décalage internes, le plan n°1 est adapté à une longueur de cycle proche de C_{\min} , le plan n°2 est applicable lorsque la longueur du cycle est comprise entre C_s et C_s+10 secondes. Les trois autres plans de décalage sont à sélectionner par vote. Une fois par cycle, une procédure de vote est mise en œuvre. Quatre votes de décalage au cours de cinq cycles consécutifs pour un même plan conduisent à l'application de ce plan. La procédure de vote se déroule comme suit :

- 1) Sélection des axes de plus fort flux parmi les axes ayant le plus fort décalage.
- 2) Pour les axes sélectionnés à l'étape 1, multiplication du flux par le décalage de chaque plan.
- 3) Sommation des produits obtenus en 2) pour chaque plan.
- 4) Vote pour le plan ayant obtenu la somme maximale au cours de l'étape 3.

3.2.6 Regroupement de sous-systèmes

Une fois par cycle, un vote pour le regroupement de deux sous-systèmes adjacents est mis en œuvre. Un vote est dit *positif* lorsque la différence entre la durée de cycle des deux sous-systèmes est inférieure à 9 secondes. Dans le cas contraire, il est déclaré *néгатif*. Un vote positif entraîne l'incrémentation de 1 d'un compteur, un vote négatif provoque sa décrémentation de 1. Le regroupement des deux sous-systèmes est effectif et appliqué lorsque le compteur a atteint la valeur 4. Lorsque deux sous-systèmes sont regroupés en un seul, la durée du cycle du nouveau sous-système est la durée maximale des deux sous-systèmes.

3.3 Régulation tactique

La régulation tactique se compose de micro-régulation avec des fonctions d'escamotage de phase et de modification des durées de vert. Les fonctions conduisant à la réduction de la durée d'une phase sont de type intervalle véhicule sur chacun des tronçons.

4 Evaluation

4.1 Evaluation de SCATS à Sydney

SCATS a été évalué à Newton, dans la banlieue de Sydney [Luk, 1984]. La première série d'évaluations a porté sur une seule artère. Des études ayant montré la non optimalité des plans de feux fixes utilisés à titre comparatif, une seconde campagne a eu lieu dans la région de Parramatta. Le site inclut Parramatta CBD, ainsi que les artères adjacentes, Great Western Highway. Les plans de feux optimaux ont été calculés par TRANSYT. Les résultats de l'évaluation se basent sur les temps de parcours et les nombres d'arrêts (Cf. Tableau 5).

Dans la zone CBD, les performances de SCATS sont similaires à celles de TRANSYT. Globalement, SCATS est de 2% meilleur que TRANSYT en terme de temps de parcours, de 1% meilleur en terme de nombre d'arrêts. Il est à noter que certains de ces résultats ne sont pas significatifs à 95%. Dans la zone Great Western Highway, notée GWH, les résultats mettent en évidence la supériorité de SCATS ; une réduction de 25 % du nombre d'arrêts est observée.

Tableau 5 - Comparaison entre SCATS et TRANSYT

Zone	Temps de parcours				Arrêts			
	différence en pourcentage entre les performances fournies par SCATS et TRANSYT (%)				différence en pourcentage entre les performances fournies par SCATS et TRANSYT (%)			
	12h à 20h	12h à 14h30	15h à 18h	18h30 à 20h	12h à 20h	12h à 14h30	15h à 18h	18h30 à 20h
CBD	- 3	- 6*	0	- 1	1	- 2	2	9*
GWH	4	0	2	9	25*	27*	21*	26*
Total	0	- 4	2	3	9*	8*	10*	14*

* significatif à 95%. Un chiffre positif représente un gain en efficacité de SCATS, par rapport à TRANSYT. Un chiffre négatif représente une perte d'efficacité de SCATS par rapport à TRANSYT

4.2 Evaluation de SCATS aux USA

SCATS a été évalué dans le cadre du projet FAST-TRAC - Faster and Safer Travel-Traffic Routing and Advanced Controls [Wolson ; Taylor, 1999]. L'objectif de l'évaluation est de mesurer l'impact de SCATS sur les temps de parcours, les retards aux traversées des carrefours et le nombre d'accidents.

Impacts sur les temps de parcours

L'évaluation a porté sur un corridor d'une longueur de 5 km, situé en environnement urbain. Le corridor comprend 4 carrefours régulés par des feux de signalisation situés à la proximité de 5 centres commerciaux.

L'objectif de l'évaluation est de mesurer l'impact de SCATS sur les temps de parcours. Les temps de parcours sont estimés le long du corridor pendant les créneaux horaires suivants : période de pointe du matin (07 :00 à 09 :00), période de point du soir (16 :00 à 18 :00), hors période de pointe (13 :00 à 15 :00). L'estimation s'appuie sur des données recueillies pendant 2 jours ouvrables avant l'utilisation de SCATS et trois jours ouvrables pendant l'utilisation de SCATS.

SCATS est comparé à une stratégie de régulation par plans de feux fixes. Pendant les jours ouvrables, trois plans de feux sont appliqués : un plan de feux pour la période de pointe du matin (06 :00 à 09 :00), un second pour la période de pointe du soir (15 :00 à 19 :00), un troisième entre 09 :00 et 15 :00.

Les résultats montrent que SCATS réduit en moyenne de 29% les retards sur l'artère principale du corridor. Le nombre de véhicules devant s'arrêter aux carrefours est réduit de 50.2% à 48.4%. La longueur des files d'attente en période de pointe est réduite en moyenne de 11.6 à 8.7 véhicules. Une analyse plus détaillée du comportement de SCATS est présentée dans [Abdel-Rahim, Taylor, Bangia, 1998].

Impacts sur les retards aux traversées des carrefours

L'évaluation a porté sur de nombreux carrefours régulés par des feux, dans la ville de South Lyon située à 66 km au Nord-Ouest de Détroit. Comme dans le cadre de l'évaluation de l'impact de SCATS sur les temps de parcours, SCATS est comparé à une stratégie de régulation par plans de feux fixes. Les résultats montrent que SCATS conduit à :

- Une augmentation moyenne de 0,8 seconde par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules allant tout droit, ce qui correspond à :
 - Une augmentation moyenne de 4,7 secondes par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules allant tout droit et empruntant les axes principaux. Ces mouvements se voient allouer par SCATS un temps de vert réduit de 4 secondes par rapport à celui alloué par la régulation par plans de feux fixes.
 - Une réduction moyenne de 4,4 secondes par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules allant tout droit, empruntant les autres axes.
- Une réduction moyenne de 4 secondes par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules tournant à gauche, ce qui correspond à :
 - Une réduction moyenne de 2,6 secondes par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules tournant à gauche, empruntant les axes principaux.
 - Une réduction moyenne de 7,2 secondes par véhicule du temps de traversée des carrefours, pour les véhicules tournant à gauche, empruntant les autres axes.

Ces mouvements se voient allouer par SCATS un temps de vert augmenté d'environ 3.6 secondes par rapport à celui alloué par la régulation par plans de feux fixes.

5 Comparaison entre Scoot et Scats

Aucune comparaison sur site des deux systèmes de régulation SCATS et SCOOT n'ayant été menée, la comparaison suivante repose uniquement sur une étude théorique des deux systèmes présentée dans [Luk, 1984].

SCATS et SCOOT sont des algorithmes qui conduisent à de petites modifications fréquentes des paramètres de régulation pour s'adapter aux fluctuations de la demande. Ils réagissent à ce qui a été mesuré et non à la prédiction de la demande. Le Tableau 6 suivant résume les caractéristiques de chacun d'eux.

Tableau 6 : Comparatif des caractéristiques de SCOOT et SCATS

SCOOT	SCATS
<u>Objectif</u> Optimisation des paramètres d'un plan de feux pour minimiser un critère de performance du réseau	<u>Objectif</u> Optimisation des paramètres d'un plan de feux pour améliorer les conditions de circulation
<u>Définition du critère</u> Indice de performance global du réseau Prise en compte des interactions entre carrefours adjacents par les décalages	<u>Définition du critère</u> Pas d'indice de performance explicite Prise en compte des interactions entre carrefours adjacents par les décalages
<u>Nature et emplacements des détecteurs</u> Boucles magnétiques en amont de la ligne de feux	<u>Nature et emplacements des détecteurs</u> Boucles magnétiques au niveau de la ligne de feux
<u>Modèle d'écoulement du trafic</u> Macroscopique	<u>Modèle d'écoulement du trafic</u> Aucun
<u>Définition du degré de saturation</u> Rapport entre le flux moyen de véhicules et le flux maximum de véhicules pouvant traverser un carrefour	<u>Définition du degré de saturation</u> Pourcentage de vert effectivement utilisé par rapport à la durée totale de vert
<u>Découpage de la région à réguler</u> Zone, carrefours, tronçons	<u>Découpage de la région à réguler</u> Systèmes et sous-systèmes. Un sous système ne comprend qu'un seul carrefour critique.
<u>Mesure de la congestion</u> Degré de saturation.	<u>Mesure de la congestion</u> Mesure du degré de saturation au niveau de la ligne de feux sur certains axes présélectionnés. Calibrage automatique du débit de saturation en fonction de conditions diverses

<p><u>Modification de la durée de cycle</u></p> <p>_Modification en fonction du niveau de saturation, de quelques secondes, toutes les 2,5 minutes voire même 5 minutes.</p> <p>Ajustement de la durée de cycle pour un fonctionnement des chaînes à 90% du degré de saturation.</p> <p>Possibilité de fonctionnement sur un demi-cycle des carrefours d'une même zone.</p>	<p><u>Modification de la durée de cycle</u></p> <p>_Modification en fonction du niveau de saturation, de plus ou moins 6 secondes, une fois par cycle selon les besoins du carrefour critique</p>
<p><u>Modification des durées de vert</u></p> <p>Elle s'appuie sur la modélisation des files d'attente et l'estimation du degré de saturation.</p>	<p><u>Modification des durées de vert</u></p> <p>4 plans de durée de vert sont prédéterminés : ils correspondent à des flux différents de trafic, associés à des configurations spécifiques de trafic.</p>
<p><u>Détermination des décalages</u></p> <p>Utilisation des profils de flux pour représenter l'effet des décalages sur les files d'attente dans le réseau</p>	<p><u>Détermination des décalages</u></p> <p>Des plans de décalage sont prédéterminés et sélectionnés pour s'adapter aux conditions actuelles du trafic : existence de décalages internes, à l'intérieur d'un même sous-système, et externes, entre sous-systèmes. Ils peuvent être modifiés en fonction du niveau de congestion.</p>

6 Autres développements

Les adaptations et développement technologiques de SCATS en Australie varient d'un côté à l'autre en fonction des priorités et des choix politiques. A Melbourne, la municipalité a plus favorisé les transports en commun que la ville de Sydney. Elle a aussi insisté sur la gestion des incidents et la mise en œuvre de plans de réponse aux incidents. En ce qui concerne la ville de Sydney, la priorité a été donnée aux développements technologiques de manière à définir les temps de parcours des automobilistes.

6.1 Priorité aux autobus et aux tramways

La version opérationnelle de SCATS à Sydney accorde la priorité aux autobus sur un trajet très fréquenté et d'une longueur de 14 km. La détection des autobus repose sur des balises et des badges à bord des véhicules.

Le réseau de tramways de Melbourne s'étend sur plus de 260 km. Trois principales mesures ont été mises en place pour promouvoir ce type de déplacement ; elles concernent le changement de législations, l'aménagement de voies en site propre, la mise en œuvre de priorités lors de la traversée des carrefours à feux. Cette dernière

inclut la prolongation et l'escamotage de phase, une anticipation du début de phase, et l'introduction de phases spécialement destinées aux tramways. Le système de détection s'appuie sur deux capteurs ; le premier situé à 200 m en amont de la ligne de feux et un second placé au niveau de la ligne de feux. L'anticipation du début de phase est réalisée par traitement des informations fournies par le capteur en amont de la ligne de feux, alors que la prolongation de la phase est implémentée à partir des données recueillies par le second capteur. Une campagne d'évaluation des performances du système a été menée en 1984 à Preston, dans la banlieue de Melbourne [Cornwell, Luk, Negus, 1986]. Le site comprend deux artères parallèles à double sens de circulation et de 11 km chacune : East Preston et West Preston Routes. Les carrefours sont situés au niveau Johnston Street longue de 750 m, de Separation Street longue de 850 m, et de Bell Street d'une longueur de 1,75 km. L'analyse porte sur la mesure du temps de parcours pendant les heures de pointe avant et après l'implémentation des priorités aux trams et la mise en œuvre de techniques de coordination des feux. Les résultats de l'évaluation sont résumés dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Performances du système de priorité aux tramways sur les artères principales du site de Preston

Artère de 11 km		Temps de parcours moyen (minute)		
		Avant la mise en place du système	Après la mise en place du système	Différence en %
TRAMWAY				
East Preston	matin	37.1	35.0	-6%*
East Preston après-midi		28.8	27.0	-6%*
West Preston	matin	34.7	31.2	-10%*
West Preston après-midi		34.2	31.0	-9%*
AUTRES VEHICULES				
East Preston	matin	29.0	27.0	-7%
East Preston après-midi		33.1	32.7	-1%
West Preston	matin	26.6	24.8	-7%
West Preston après-midi		25.7	25.4	-1%

*significatif à 95%

Le tableau met en évidence la réduction des temps de parcours aussi bien pour les tramways et pour les autres véhicules. Sur l'axe West Preston, pendant l'heure de pointe du matin, une réduction de 10%, significative à 95%, est observée. Sur ce même axe, les autres types de véhicule bénéficient aussi des mesures mises en œuvre. Il est en effet estimé une réduction de 7% du temps de parcours moyen. Il est important de souligner que les performances décrites ne sont pas seulement liées à l'introduction de priorité aux trams. Elles découlent aussi de l'implémentation de techniques de coordination des feux.

Tableau 8 : Performances du système de priorité aux tramways sur les axes transversaux du site de Preston

Axes transversaux		Temps de parcours moyen (minute)		
		Avant la mise en place du système	Après la mise en place du système	Différence en %
Johnston Street	matin	3.4	2.0	-41%*
Johnston Street	après-midi	2.7	2.5	-4%
Separation Street	matin	5.6	4.9	-13%*
Separation Street	après-midi	5.1	5.2	+2%
Bell Street	matin	4.0	4.5	13%*
Bell Street	après-midi	4.5	4.1	-7%*

*significatif à 95%

Le Tableau 8 montre que, pour la majorité des véhicules circulant sur les axes transversaux, le temps de parcours est aussi réduit. Seule une augmentation significative de 13% est observée pendant la période de pointe du matin sur l'axe Bell Street.

6.2 Estimation des temps de parcours

Les balises et badges nécessaires à la détection des véhicules de transport en commun sont aussi utilisés pour l'estimation des temps de parcours. Quatre cent points de mesure sont installés à Sydney et 6000 véhicules sont équipés. Ce système est appelé ANTTS « Automatic Network Travel Time System ».

6.3 Améliorations en cours

Ils incluent [Orselli, 1995]:

- l'utilisation de panneaux à messages variables pour l'information aux usagers,
- le développement d'algorithmes pour la prédiction de l'évolution du trafic,
- la prédiction de la demande sur un ou plusieurs cycles, et l'optimisation des paramètres en fonction de cette prédiction,
- la diminution du temps de réponse entre l'acquisition des données et la mise en application d'un plan de feux pour être plus adaptatif aux variations de conditions de trafic,
- la combinaison entre les paramètres mesurés au cours des cycles précédents et présent pour améliorer la régulation.

7 Récapitulatif des variables utilisées par SCATS

Capteurs utilisés	Boucles magnétiques localisées au niveau de la ligne de feux.
Variables issues des capteurs	<u>Débit sortant</u> <u>Taux d'occupation temporelle d'une boucle magnétique</u>
Variables du trafic reconstruites	<u>Degré de saturation</u> <ul style="list-style-type: none"> définition: pourcentage de vert effectivement utilisé par rapport à la durée totale de vert. Il est calculé en fonction des données fournies par les détecteurs, au niveau de la ligne de feux. rôle: sélection des plans de feux, calcul de la durée du cycle.
Variables de commande	<u>Durée de vert</u> sélectionnée dans une bibliothèque, à chaque cycle, en fonction du degré de saturation. <u>Durée de cycle</u> calculée directement en fonction du degré de saturation, à chaque cycle. Modifiée une fois par cycle avec une variation d'au plus 6 secondes. <u>Décalages</u> sélectionnés parmi 5 plans prédéterminés pour chaque carrefour en fonction de la durée de cycle ou de l'amplitude des flux.
Critère optimisé	Pas d'optimisation de critère analytique.

8 Bibliographie

- Abdel-Rahim (A.), Taylor (W.C.), Bangia (A.). – The SCATS effect. *Traffic Technology International*, February/March 1998, pp 57-60.
- Cornwell (P.R.), Luk (J.Y.K.), Negus (B.J.). - Tram priority in SCATS. *Traffic Engineering and Control*, 1986, vol. 27, pp 561 – 565.
- Lowrie (P.R.). - The Sidney Co-ordinated Adaptive Traffic System: Principles, Methodology, and Algorithms. Proceedings of the IEE Conference on Road Traffic Signalling, London, 1982, IEE Pub. n° 207, pp 67 - 70.

- Luk (J.Y.K). - Two Traffic Responsive Area Traffic Control Methods: SCAT and SCOOT. *Traffic Engineering and Control*, 1984, pp 14 – 22.
- Orselli. (J.). - SCATS: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System. *Traffic Engineering and Control*, n°129, Mars-Avril 1995, pp 3-7. Orselli. (J.). - SCATS: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System. *Traffic Engineering and Control*, n°132, Septembre - Octobre 1995, pp 3-7.
- Sims (A.G.), Dobinson (K.W.). - SCAT: the Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic system philosophy and benefits. *Proceedings of the International Symposium on Traffic Control Systems*, vol 2B, 1979, pages 19-41.
- Wolson (B.), Taylor (W.C.). – Impact of Adaptive Signal Control on Major and Minor Approach Delay, *Journal of Transportation Engineering*, January/February 1999, pp 30-38.
- Wolson (B.), Taylor (W.C.). – Analysis of Intersection Delay under Real-time adaptive Signal Control – *Transportation Research Part C*; N° 7, 1999, pp 53-72.

Chapitre III

UTOPIA

1 Introduction

1.1 Le système

UTOPIA - *Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation* - a été créé en 1983, en Italie [Di Taranto et al., 1989], [Donati et al., 1984]. Il s'inscrit dans le cadre du projet "Progetto Torino" dont l'objectif est d'assurer de meilleures conditions de circulation aux véhicules de type transport en commun, sans cependant défavoriser les autres types de véhicule. Il propose d'exploiter la coordination des feux de signalisation pour leur accorder la priorité. Implanté à Turin, il y est opérationnel depuis 1984.

1.2 Les caractéristiques

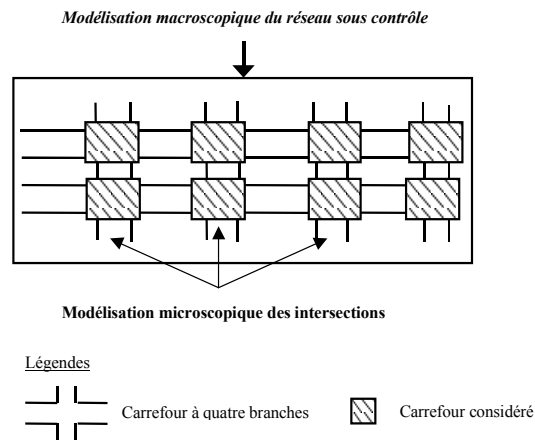
Le problème de la régulation globale d'un réseau de carrefours est décomposé en de nombreux sous-problèmes de régulation locale, au niveau de chacun des carrefours. Ce système est caractérisé par une architecture distribuée dans laquelle la prise de décision intervient tant au niveau global que local. Cette architecture distribuée repose sur l'utilisation de plusieurs modèles d'écoulement de trafic et l'échange d'informations entre les niveaux locaux et globaux.

2 Modélisation du trafic

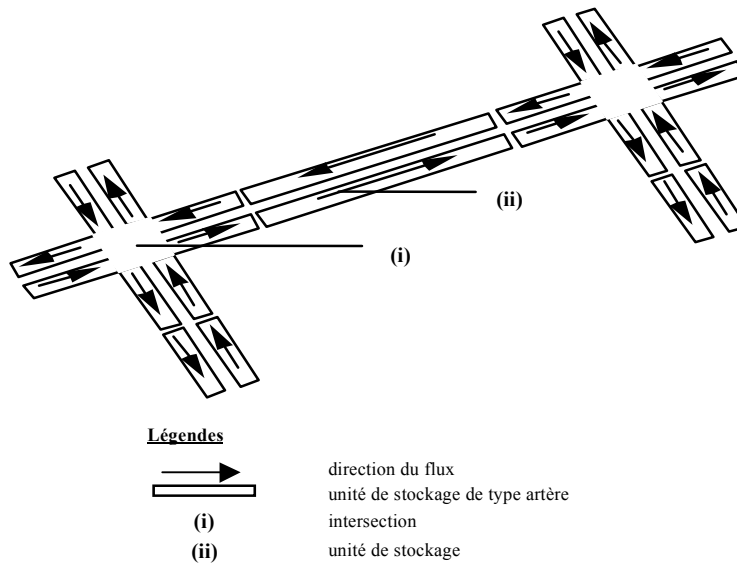
2.1 Représentation du réseau

La stratégie de régulation mise en oeuvre par UTOPIA repose sur trois modèles de trafic (Cf. Figure 5):

- *un modèle macroscopique*, permettant la modélisation du comportement des pelotons de véhicules privés (opposés aux véhicules de transport en commun) dans la région sous contrôle,
- *un modèle microscopique*, fournissant une représentation détaillée du comportement des véhicules privés à chaque carrefour,
- *un modèle pour les véhicules de transport en commun*, décrivant le comportement de chacun d'eux.

Figure 5 : Modélisation de la zone sous contrôle.

La Figure 6 fournit la représentation macroscopique du réseau. Un ensemble de carrefours et leurs tronçons adjacents définissent une intersection. Les artères principales du réseau et les intersections sont considérées comme des "unités de stockage", interconnectées les unes aux autres. Pour les artères, ces unités de stockage sont unidirectionnelles.

Figure 6 : Représentation macroscopique du réseau

2.2 Les capteurs

Chacun des modèles précédents s'appuient sur des mesures fournies en temps réel par des capteurs. Ces capteurs sont généralement des boucles magnétiques, disposées en fin de tronçons, près des lignes de feux pour la détection des véhicules privés. Afin d'accorder aux véhicules de type transport en commun une priorité aux carrefours, des capteurs sont également nécessaires à leur détection. Ils sont localisés à l'entrée et à la sortie de chaque station de bus. D'autres boucles jalonnent les tronçons.

2.3 Modèles d'écoulement

2.3.1 Le modèle macroscopique

L'évolution du trafic dans le réseau est décrite suivant les lois discrètes d'écoulement et de propagation des flux. Le temps est discrétisé en pas de temps de 3 minutes. La loi d'écoulement du trafic s'écrit $O_i^k = f^k(x_i^k, \alpha_i^k, \beta_i^k)$.

dans laquelle :

O_i^k est le nombre de véhicules quittant l'unité de stockage k , pendant l'intervalle i ,

x_i^k est le nombre de véhicules dans l'unité de stockage k , pendant l'intervalle i ,

α_i^k est un paramètre lié à la vitesse moyenne de parcours de l'unité de stockage k , pendant l'intervalle i ,

β_i^k est un paramètre lié au débit de saturation de l'unité de stockage k , pendant l'intervalle i ,

f^k est une fonction dépendant de l'unité de stockage k .

Les échanges entre unités de stockage s'expriment en fonction de la donnée de la matrice Origines-Destinations.

Le modèle d'écoulement macroscopique du trafic est utilisé pour:

- identifier en continu les paramètres décrivant l'écoulement du trafic de manière macroscopique,
- détecter les fluctuations dans l'écoulement du trafic,
- optimiser le fonctionnement de la région sous contrôle.

2.3.2 Le modèle microscopique

Chaque intersection est considérée comme un système dynamique à états discrets. Le pas de temps i est de 3 secondes. L'état d'une intersection est décrit par la formule :

$$y_i^k = \eta_i^{k,1}, \eta_{i+1}^{k,1}, \dots, \eta_{i+L}^{k,j}, \dots,$$

dans laquelle

y_i^k est l'état de l'intersection k , à l'intervalle i , et $\eta_{i+L}^{k,j}$ représente le nombre de véhicules présents sur le tronçon j de l'intersection k , à la distance amont de l'intersection égale à L fois le pas de temps.

La loi de propagation des flux à l'intérieur de l'intersection k dépend de l'état des feux sur les unités de stockage adjacentes, et est donnée par $y_{i+1}^k = f(y_i^k, c_i^k, y_i^m, c_i^m, y_i^n, \dots)$

dans laquelle

c_i^k représente l'état des feux de l'intersection k , à l'intervalle i ,

$y_i^m, c_i^m, y_i^n, \dots$ font référence aux intersections $m, n \dots$ adjacentes à l'intersection k .

Le modèle microscopique d'écoulement du trafic est appliqué, au niveau d'une intersection, pour :

- la commande locale des feux tricolores,
- le suivi des paramètres décrivant l'écoulement du trafic de manière microscopique,
- le diagnostic des conditions anormales de circulation.

La description microscopique de l'écoulement du trafic sur le réseau dépend du pourcentage des mouvements tournants, du débit de saturation, de la vitesse moyenne de parcours sur les différents tronçons.

2.3.3 Modélisation des transports en commun

Afin d'accorder une priorité aux véhicules de transport en commun lors de la traversée des carrefours, un modèle d'écoulement s'avère nécessaire pour prédire leurs instants d'arrivée aux carrefours. L'horizon de prédiction est fixé à 8 minutes. La prédiction s'appuie sur l'hypothèse que le temps de parcours de l'itinéraire par un véhicule de transport en commun est fonction de :

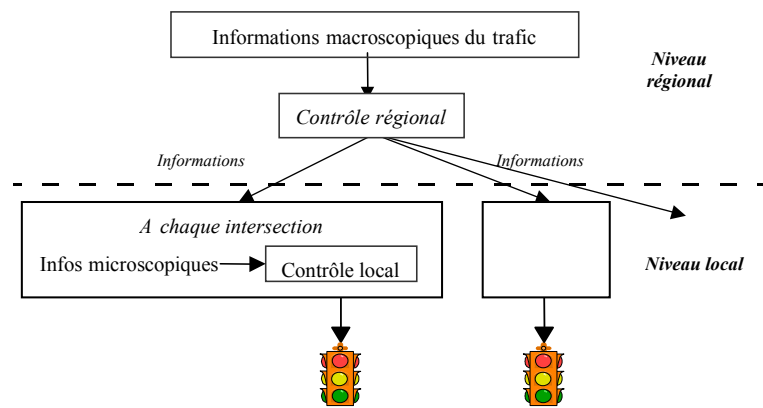
- sa vitesse libre,
- son temps d'attente lié aux arrêts,
- son temps perdu aux carrefours à feux. C'est ce paramètre qu'UTOPIA tente de minimiser.

Outre la prédiction des instants d'arrivée en stations et aux carrefours, ce modèle d'écoulement est aussi utile au diagnostic automatique des perturbations.

3 Méthode de régulation

L'objectif d'UTOPIA est de minimiser le temps total perdu par les véhicules privés lors de leur trajet. Cette optimisation est contrainte par la priorité accordée aux véhicules de transport en commun qui doivent être arrêtés le moins fréquemment possible aux carrefours. La régulation du réseau s'effectue à deux niveaux: un niveau *régional* et un niveau *local* (Cf. Figure 7).

Figure 7 : Synoptique général de l'architecture de régulation



Pour chaque niveau, la fonction de régulation est réalisée par la coopération de deux acteurs : un observateur et un contrôleur.

- *Au niveau régional*: le contrôleur régional a un rôle de supervision et assure l'optimisation globale du réseau ; il transmet aux différents niveaux locaux des règles à appliquer sous forme de plans de feux de référence. Si ces règles sont respectées, le fonctionnement optimal du réseau est alors assuré.
- *Au niveau local*: chaque contrôleur agit selon son propre modèle microscopique d'écoulement du trafic, en utilisant au maximum l'information provenant du niveau supérieur. Il assure l'optimisation au niveau local.

3.1 Le niveau régional: la supervision

La régulation s'appuie ici sur la modélisation macroscopique de l'écoulement du trafic. L'objectif est de minimiser le temps total passé dans le réseau par les véhicules privés. L'optimisation se fait sur un horizon de 30 minutes et est effectuée à chaque fois qu'un changement dans les prédictions des conditions de trafic intervient.

3.1.1 Rôle de l'observateur régional

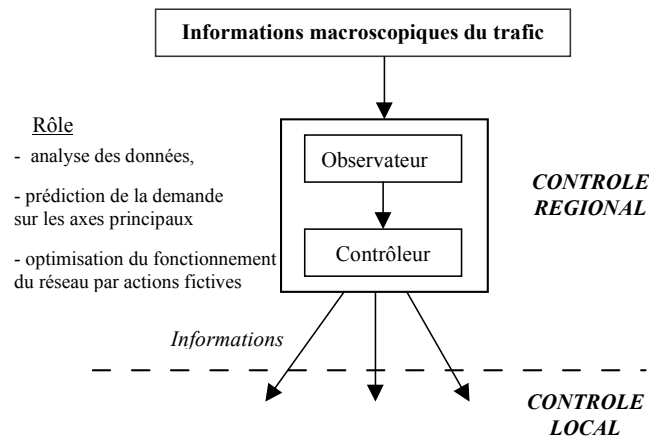
L'observateur régional a pour fonction :

- D'analyser les données relatives aux conditions de trafic, provenant de toute la zone sous contrôle.
- De prédire en temps réel les principaux itinéraires empruntés par les véhicules privés ainsi que la demande à l'origine de ces itinéraires. Ces prédictions sont réalisées toutes les trois minutes.

3.1.2 Rôle du contrôleur régional

Le contrôleur régional est chargé de l'optimisation du fonctionnement du réseau par des actions fictives (Cf. Figure 8). Le critère optimisé est le temps de parcours du réseau. La procédure d'optimisation est déclenchée chaque fois que l'observateur détecte un changement dans les prédictions des conditions de trafic. Le contrôleur en déduit alors la vitesse moyenne et le débit de saturation sur chaque tronçon. Il traduit ensuite ces valeurs sous forme de plans de feux de référence à transmettre aux niveaux locaux et sous forme de coefficients de pondération sur les différents termes du critère local optimisé. Les actions entreprises par le contrôleur régional sont fictives car elles n'aboutissent à aucun réglage proprement dit.

Figure 8 : Régulation au niveau régional



3.2 Le niveau local

La régulation au niveau local s'appuie sur la modélisation microscopique de l'écoulement du trafic. C'est le niveau le plus bas dans le processus de régulation mise en oeuvre par UTOPIA. Il est appliqué à chaque intersection et est caractérisé par des échanges d'informations entre contrôleurs locaux d'intersections adjacentes.

3.2.1 Rôle de l'observateur local

L'observateur local a pour objectif de :

- Réactualiser les estimations des données décrivant le fonctionnement de l'intersection.
- Fournir des estimations sur les temps de parcours des tronçons, les pourcentages de mouvements tournants et les débits de saturation.
- Fournir des informations sur la congestion locale au carrefour.

3.2.2 Rôle du contrôleur local

Le contrôleur local détermine la commande des feux tricolores à appliquer au carrefour considéré, tout en tenant compte de l'état des carrefours voisins (Cf. Figure 9). Le critère optimisé est la somme pondérée, sur tous les tronçons reliés à l'intersection traitée, des:

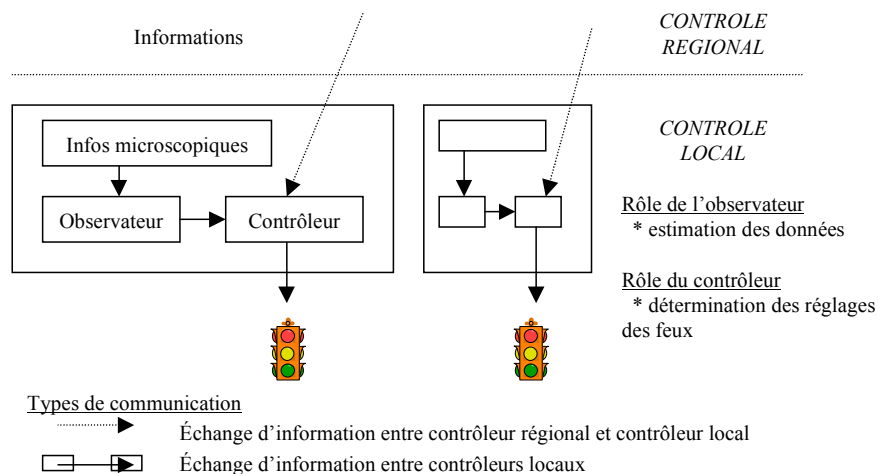
- Temps perdus par les véhicules,
- Nombres d'arrêt,
- Longueurs maximales des files d'attente.

Ces informations sont obtenues en établissant un dialogue entre le contrôleur local au carrefour considéré et les contrôleurs voisins.

Le critère optimisé est fonction de l'état actuel du trafic sur le carrefour considéré, et des prédictions effectuées sur un horizon de 120 secondes. L'optimisation est répétée toutes les 6 secondes pour réagir rapidement aux variations du trafic.

La priorité aux véhicules de transport en commun est implémentée comme suit. Le contrôleur local envoie un message au contrôleur central à chaque fois qu'un véhicule de transport en commun est détecté. Le contrôleur central prédit alors l'arrivée du véhicule à chacun des carrefours situés en aval du carrefour où il a été détecté. Cette prédiction est effectuée sur un horizon de 8 minutes. Elle est ensuite envoyée par le contrôleur central à chacun des contrôleurs locaux concernés pour l'élaboration des plans de feux.

Figure 9 : Régulation au niveau local



Le contrôleur local est capable de réagir à des problèmes de saturation détectés par les observateurs locaux ; il peut alors soit relaxer les contraintes sur les durées de vert pour évacuer les véhicules vers les tronçons voisins, soit inclure dans la fonction à optimiser un critère d'évaluation du coût d'envoi de véhicules sur les tronçons adjacents.

4 Evaluation

4.1 Evaluation à Turin

UTOPIA a été testé dans le cadre de "Progetto Turino", à Turin, Italie. Deux principales raisons expliquent le choix stratégique de la ville de Turin :

1 - Le trafic lié aux véhicules privés est important et présente des variations quotidiennes significatives.

2 - les véhicules de type transport en commun ont une influence non négligeable sur l'écoulement du trafic. La priorité est accordée aux bus de la ligne 10.

La zone sous contrôle est située à proximité du centre de Turin et s'étend sur plus de 7 km² [Di Taranto, Mauro, 1989]. Elle comprend 39 feux tricolores et 4 contrôleurs accordant la priorité aux piétons. La ligne de bus 10 traverse la zone sous contrôle. Son itinéraire ne traverse que quelques carrefours empruntés par les véhicules privés.

Le système de régulation comprend 33 contrôleurs de carrefours, 1 contrôleur de zone; 400 boucles magnétiques pour la détection des véhicules privés et 112 capteurs pour la détection des véhicules de transport en commun. Son évaluation a été menée pendant deux semaines à la même période en 1985 et en 1986.

Une augmentation des vitesses des véhicules privés est constatée : +9,5% en 1985, +15,9% en 1986. L'accroissement observé en 1986 est principalement lié à un meilleur paramétrage du système. Dans le cas de fort trafic, cette augmentation peut atteindre jusqu'à +35%. Les vitesses moyennes de véhicules de transport en commun se sont accrues de +19,9% soit un accroissement de la vitesse de 15.25 km/h à 28.29 km/h. En ce qui concerne la priorité accordée aux véhicules de transport en commun, elle est respectée à la plupart des intersections. Les principaux arrêts aux intersections sont soit causés par des obstacles, soit liés à des consignes de sécurité.

4.2 Le projet Primavera

Le projet européen Primavera (Drive II) a eu pour principal objectif l'intégration au sein d'une même plate-forme de différentes techniques avancées de gestion du trafic en milieu urbain [Fox, Montgomery, May, 1995]. Ces techniques incluent les systèmes de commande des feux SCOOT et UTOPIA, ainsi que leurs modules de gestion de la priorité aux véhicules de transport en commun. Ainsi, UTOPIA a été implémenté sur le site pilote de Dewsbury Road à Leeds, Grande Bretagne.

Les résultats de l'expérimentation sont présentés dans [Fox, Balmforth, Franklin, Montgomery, Ling Siu, 1995]. Le site correspond en fait à une portion de l'autoroute A653 longue de 3 km. Il est très fortement fréquenté à cause de sa proximité des zones résidentielles et industrielles, des centres commerciaux et du centre ville. Le débit journalier s'élève à environ 23 000 véhicules. Le trafic lié aux véhicules de transport en commun est aussi très important; pendant les heures de pointe, le débit peut excéder 36 bus par heure. Outre les problèmes de congestion, la sécurité est aussi un souci majeur ; le site présente un taux d'accident 1,5 fois plus élevé que la moyenne des sites

présentant des caractéristiques similaires. L'objectif fixé pour le site de Leeds est d'intégrer différentes techniques de gestion des files d'attente, de priorité aux bus et d'information aux usagers par l'intermédiaire de PMV pour assurer une plus grande sécurité et améliorer les conditions d'écoulement des divers flux. La version d'UTOPIA qui est évaluée dans [Fox, Balmforth, Franklin, Montgomery, Ling Siu, 1995] est par conséquent une version différente de celle décrite dans le présent chapitre. C'est la raison pour laquelle les résultats ne sont pas détaillés ici.

5 Récapitulatif des caractéristiques

Pays de développement	Italie
Zone sous contrôle	Réseau décrit par un ensemble de chaînons et de nœuds
Type de modélisation de trafic	<ul style="list-style-type: none"> • Macroscopique pour le réseau. • Microscopique pour les véhicules privés dans les intersections. • Modèle pour les transports en commun.
Origine des données de trafic	<p>En ligne: les capteurs implantés en fin et le long du chaînon.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réseau toutes les 3 minutes. • Local toutes les 3 secondes.
Définition du critère de performance	<ul style="list-style-type: none"> • Global au niveau du réseau: temps total de parcours pour les véhicules privés. • Local au niveau des intersections: somme pondérée des temps perdus, nombres d'arrêt, longueurs maximales des files d'attente. Prise en compte des interactions entre carrefours adjacents.
Méthode de régulation	<p>Coopération entre les deux acteurs suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contrôleur régional qui assure un rôle de superviseur et fournit des plans de feux de référence aux contrôleurs locaux. • Contrôleur local qui détermine les réglages locaux en fonction des recommandations du contrôleur régional et de ses propres informations.
Paramètres optimisés	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau: Plans de feux de référence, pondération des différents termes du critère local optimisé. • Local : états des feux

Prédictions	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau: prédiction toutes les 3 minutes des axes les plus fréquentés sur un horizon de 30 minutes. • Local: toutes les 6 secondes sur un horizon de 2 minutes.
Fréquence d'optimisation	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau: à chaque changement dans les prédictions du trafic. • Local: toutes les 6 secondes.
Architecture de régulation	Partiellement décentralisée: deux niveaux de régulation.

6 Récapitulatif des variables du trafic utilisées par UTOPIA

Capteurs utilisés	Boucles magnétiques, implantées en fin de tronçons pour permettre la détection des véhicules privés et de transport en commun.
Variables issues des capteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Débit sortant, • Taux d'occupation temporelle.
Fréquence des mesures	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes les 3 minutes au niveau macroscopique, • Toutes les 3 secondes au niveau microscopique.
Variables réactualisées au cours de la simulation	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Pourcentage de mouvements tournants</u> (réévaluation au niveau micro) rôle: estimation de la matrice des origines/destinations. • <u>Temps de parcours de chaque tronçon.</u> rôle: influence dans le calcul de l'écoulement du trafic au niveau macroscopique. • <u>Débit de saturation</u> rôle: modélisation du nombre de véhicules sortant d'un tronçon. Ré-évaluation aux niveaux microscopique et macroscopique.

Variables modélisées	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Au niveau macroscopique</u>: écoulement du trafic, fonction du nombre de véhicules quittant le chaînon, du nombre de véhicules sur le chaînon, de paramètres liés à la vitesse moyenne de parcours et au taux de saturation du chaînon. Pas de discrétisation temporelle de 3 minutes. • <u>Au niveau microscopique</u>: état d'une intersection, fonction du nombre de véhicules présents sur les chaînons de l'intersection. Pas de discrétisation temporelle de 3 secondes.
Variables prédites	Au niveau macroscopique, prédiction toutes les 3 minutes des axes les plus fréquentés sur un horizon de 30 minutes.
Variables de commande	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau: Paramètres du plan de feux. Poids des différents termes du critère local optimisé. • Local : états des feux.
Critères à optimiser	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Au niveau macroscopique</u>, minimiser le temps passé sur le réseau par les véhicules privés, sachant que les bus doivent être arrêtés le moins fréquemment possible aux carrefours à feux. Les valeurs issues de la minimisation du critère sont transformées en valeurs de référence, envoyées aux contrôleurs locaux. • <u>Au niveau microscopique</u>, le critère optimisé est la somme pondérée des: <ul style="list-style-type: none"> ▪ temps perdus par les véhicules au carrefour considéré, ▪ nombres de véhicules arrêtés, longueurs maximales des files d'attente, temps perdus par les transports en commun.
Fréquence et horizon d'optimisation	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Au niveau macroscopique</u>: optimisation à chaque fois qu'un changement dans les prédictions sur les conditions de trafic est détecté. Horizon de 30 minutes. • <u>Au niveau microscopique</u>, optimisation effectuée toutes les 6 secondes. Horizon de 2 minutes.

7 Bibliographie

- Donati (F.), Mauro (V.), Roncolini (G.), Vallauri (M.). - A Hierarchical Decentralized Traffic Light Control System. The First Realization: Progetto Torino. *9th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, Budapest, Hungary, July 2-6, 1984, Vol II 11G/A-1.
- Di Taranto, Mauro (V.). – UTOPIA. *IFAC Control, Computers, Communications in Transportation*, Paris, 1989, pp 575 - 597.
- Fox (K.), Montgomery (F.), May (T.). – Integrated ATT Strategies for Urban Arterials: Drive II project Primavera. *Traffic Engineering & Control*, May 1995, pp 268-271.
- Fox (K.), Bamforth (P.), Franklin (P.), Montgomery (F.), Ling Siu (Y.) - – Integrated ATT Strategies for Urban Arterials: Drive II project Primavera; The Dewsbury Road Experiment. *Traffic Engineering & Control*, August 1995, pp 427-431.

Chapitre IV

PRODYN

1 Introduction

1.1 Le système

PRODYN - PROgrammation DYNamique - a été développé au début des années 1980 par le CERT, Centre d'Etudes et de Recherches de Toulouse [Henry et al., 1990], [Farges et al., 1991]. Il a été testé sur la ZELT, Zone Expérimentale et Laboratoire de Trafic de Toulouse [Olivero, 1994], de 1987 à 1990. Il est actuellement industrialisé par les sociétés Garbarini et GTMH et implanté à Bruxelles, Niort, Toulouse, Biarritz, Neuilly-sur-Seine, Pau, et Rouen.

1.2 Les caractéristiques

Il n'existe plus, dans cette stratégie de régulation, de notion de plan de feux. La partie commande repose sur un processus de décision, se déroulant sur une période très courte, concluant soit de conserver les feux d'un carrefour dans leur état courant soit de les faire commuter dans l'état suivant. La décision est prise au terme d'un calcul d'optimisation déterminant une séquence optimale de commutations sur un horizon d'une longueur fixe. L'optimisation fait appel à des méthodes avancées de modélisation et d'optimisation telles que l'estimation bayésienne et la programmation dynamique.

Comme pour UTOPIA, le problème de la régulation globale d'un réseau de carrefours est décomposé en de nombreux sous-problèmes de régulation locale, mis en oeuvre au niveau de chaque carrefour. La coordination globale est ensuite assurée par un échange d'informations entre chaque carrefour et ses voisins immédiats.

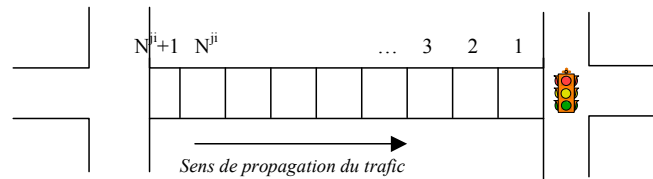
2 Modélisation du trafic

2.1 Représentation du réseau

Le réseau est décomposé en un certain nombre de tronçons sur lequel l'écoulement du flux de trafic est unidirectionnel. L'espace interne de chacun des carrefours est considéré comme ponctuel. Chaque tronçon est découpé en N segments de même longueur (Cf. Figure 10). Les véhicules sont supposés parcourir le tronçon à vitesse constante. La longueur des segments est choisie de manière à ce que chaque véhicule

parcourt un segment en une unité de temps, fixée à 5 secondes. Seul le dernier segment d'un tronçon ne possède qu'une fraction de cette longueur.

Figure 10 : Représentation d'un tronçon



2.3 Capteurs

Trois capteurs de type boucle magnétique sont généralement implantés sur chaque tronçon, l'un en début de tronçon, le deuxième à une cinquantaine de mètres de la ligne de feux et le troisième sur la ligne de feu. Seul celui situé en début de tronçon est obligatoire. Il fournit une mesure du nombre de véhicules en entrée du tronçon, à chaque unité de temps. Les données fournies par les capteurs permettent de :

- Calculer le nombre de véhicules sur le premier segment du tronçon, pour le premier pas de temps.
- Estimer la longueur des files d'attente verticales au niveau de la ligne de feux.
- Prédire les arrivées futures au niveau de la ligne de feux, sur l'horizon.

Le capteur, implanté à une cinquantaine de mètres de la ligne de feux, fournit, toutes les 5 secondes, une valeur de débit. Ces données contribuent à une meilleure estimation des files d'attente verticales.

Le troisième capteur mesure la présence d'un véhicule. Il est utilisé pour contraindre la durée de rouge maximum visible par un usager en attente.

2.4 Modèle d'écoulement

L'écoulement du trafic est décrit de manière macroscopique. Le temps est discrétisé par pas de 5 secondes. PROLYN propage les véhicules à vitesse constante sur les tronçons pour les faire entrer au niveau de la ligne de feux dans une file d'attente verticale. L'écoulement du trafic est décrit par un ensemble de variables et d'équations d'état. Il doit aussi tenir compte des valeurs des variables de commande.

Le modèle d'écoulement présenté s'applique à un carrefour à 4 branches et à 2 phases. Des versions plus récentes de PROLYN considèrent plus de 2 phases et un nombre d'approches limité à 10. L'horizon de prédiction est fixé à 75 secondes.

2.4.1 Définition des variables de commande

Soit respectivement i et k l'indice du carrefour sous contrôle et le pas de temps correspondant à l'instant présent. L'instant présent t s'écrit : $t = k T$, avec T le pas de temps de 5 secondes.

La commande est définie, pour le carrefour i au $k^{\text{ème}}$ pas de temps, par la variable V_k^i . $V_k^i = 0$ signifie qu'aucune commutation de l'état des feux n'est appliquée. $V_k^i = 1$ signifie qu'une commutation de l'état des feux est appliquée.

2.4.2 Définition des variables d'état

Soit j l'indice du tronçon pour le carrefour i , à l'instant k . Ici, j varie de 1 à 4.

Ainsi, sont définis :

- X_k^{ji} la longueur de la file d'attente verticale, exprimée en nombre de véhicules. Cette variable influe directement sur le critère à optimiser. Elle est obtenue :
 - Pour l'instant courant plus 5 secondes, par analyse de la corrélation de la mesure fournie par le capteur intermédiaire avec d'une part la commande des feux, et d'autre part la mesure fournie par le capteur le plus éloigné.
 - Pour les 75 secondes suivantes, par l'intégration de l'équation d'état dans le processus d'optimisation.
- W_k^i le temps de vert écoulé depuis la dernière commutation.
- U_k^i la phase ayant le vert. Si $U_k^i = 0$ alors les feux associés aux tronçons 1 et 3 ont le feu vert, si $U_k^i = 1$ alors les feux associés aux tronçons 2 et 4 ont le feu vert.
- y_k^{is} durée de rouge écoulée pour la phase en cours notée s .
- A_k^{ji} le nombre de véhicules arrivant dans le $l^{\text{ème}}$ segment du tronçon j du carrefour i pendant l'intervalle k .
- m_k^{ji} proportion de voirie non bloquée par les mouvements non prioritaires.

L'écoulement du trafic doit tenir compte d'autres paramètres tels que le débit de saturation et les pourcentages de mouvements tournants. Le débit de saturation est présent dans l'équation d'évolution des files d'attente. Il est fixé par l'utilisateur. Les pourcentages de mouvements tournants sont utilisés pour prédire les arrivées des véhicules dans le premier segment amont de chaque tronçon, et réaliser la coordination entre carrefours. Ils sont également fixés par l'utilisateur.

2.4.3 Définition des équations d'état

Les équations d'état définissent la dynamique des variables d'état.

Equation n° 1:
$$U_{k+1}^i = U_k^i + V_k^i - 2U_k^i V_k^i$$

Cette équation signifie que la phase au vert, à l'instant $k+1$, dépend de la phase au vert à l'instant k et de l'existence ou non d'une commutation à l'instant k . Le Tableau 9 résume la dynamique de la variable U_{k+1}^i .

Tableau 9 : Dynamique de la phase au vert, à l'instant k+1, en fonction des états à l'instant k

Etats de la commande, à l'instant k+1, en fonction des états à l'instant k	Vert sur les tronçons 1 et 3 $U_k^i = 0$	Vert sur les tronçons 2 et 4 $U_k^i = 1$
Pas de commutation $V_k^i = 0$	$U_{k+1}^i = 0$	$U_{k+1}^i = 1$
Commutation $V_k^i = 1$	$U_{k+1}^i = 1$	$U_{k+1}^i = 0$

Equation n° 2: $W_{k+1}^i = (W_k^i + 1) (1 - V_k^i)$

Le temps de vert écoulé depuis la dernière commutation augmente d'une unité s'il n'y a pas eu de commutation par rapport à l'instant précédent, sinon il est réinitialisé à zéro. Le Tableau 10 représente le temps de vert écoulé, depuis la dernière commutation jusqu'à l'instant $k+1$.

Tableau 10 : Temps de vert écoulé, à l'instant k+1, depuis la dernière commutation

Temps de vert écoulé, depuis la dernière commutation	W_k^i
Pas de commutation $V_k^i = 0$	$W_{k+1}^i = 1 + W_k^i$
Commutation $V_k^i = 1$	$W_{k+1}^i = 0$

Equation n° 3: Calcul de la durée de rouge écoulée pour la phase en cours notée s .

$$y_{k+1}^{is} = 0 \quad \text{si } V_k^i = s \quad \text{ou si } y_k^{is} = 0 \quad \text{et la phase } s \text{ n'est pas appelée}$$

$$y_{k+1}^{is} = y_k^{is} + 1 \quad \text{dans les autres cas}$$

Equations n° 4: Dynamique de la longueur de file d'attente verticale

Equation n° 4-1, pour les tronçons 1 et 3

$$X_{k+1}^{ji} = \max\left(0, X_k^{ji} + A_k^{ji} - (1 - U_k^i) \left(dV^{ji} (1 - V_k^i) + dO^{ji} V_k^i \right) \right) m_k^{ji}$$

dans laquelle dO^{ji} est le débit de saturation maximal pendant les durées d'orange et de rouge intégral et dV^{ji} est le débit de saturation pendant la durée de vert.

La file d'attente, à l'instant $k+1$, est égale à la file d'attente à l'instant précédent, à laquelle sont ajoutées les arrivées dans la file, et sont retranchées les sorties du tronçon. Si la file d'attente devient "négative", elle est annulée. Le Tableau 11 représente la dynamique de la longueur des files d'attente, à l'instant $k+1$, en fonction des états et de la commande, à l'instant k .

Tableau 11 : Longueur des files d’attente, à l’instant k+1, en fonction des états et de la commande, à l’instant k

Longueur des files d’attente	Vert sur les tronçons 1 et 3 $U_k^i = 0$	Rouge sur les tronçons 1 et 3 $U_k^i = 1$
Pas de commutation $V_k^i = 0$	$X_{k+1}^{ji} = \max(0, X_k^{ji} + {}^1A_k^{ji} - dV^{ji} m_k^{ji})$	$X_{k+1}^{ji} = \max(0, X_k^{ji} + {}^1A_k^{ji})$
Commutation $V_k^i = 1$	$X_{k+1}^{ji} = \max(0, X_k^{ji} + {}^1A_k^{ji} - dO^{ji} m_k^{ji})$	$X_{k+1}^{ji} = \max(0, X_k^{ji} + {}^1A_k^{ji})$

Equation n° 4-2, pour les tronçons 2 et 4

La longueur de file d’attente s’obtient en remplaçant U_k^i par $1 - U_k^i$, soit:

$$X_{k+1}^{ji} = \max(0, X_k^{ji} + {}^1A_k^{ji} - U_k^i [(dV^{ji}(1 - V_k^i) + dO^{ji}V_k^i)] m_k^{ji})$$

Equation n° 5: Expression des arrivées sur un tronçon j

Cette variable influe la dynamique de la longueur de la file verticale. On rappelle que chacun des tronçons unidirectionnels est découpé en un certain nombre de segments. La longueur d’un segment est telle que le segment est parcouru en un pas de temps. Tous les segments sont de longueur identique sauf le dernier qui peut être de longueur inférieure.

En supposant que tous les véhicules parcourent un segment du tronçon en une unité de temps, les arrivées sur un segment du tronçon j sont obtenues par propagation du trafic depuis le segment numéroté $(N^{ji} + 1)$ dans la Figure 10 vers le segment numéroté l . Les arrivées sur le segment numéroté $(N^{ji} + 1)$ sont obtenues :

- Pour l’instant courant, par mesure directe du débit fourni par le capteur amont.
- Pour les instants futurs :
 - S’il n’y a pas de carrefour PRODYN en amont, par lissage du débit du capteur amont.
 - S’il y a en amont un carrefour PRODYN, par estimation en fonction de la dernière séquence de commandes optimales sur 75 secondes, de la longueur des files d’attente et des pourcentages de mouvements tournants.

La propagation du trafic sur le tronçon j s’exprime par l’ensemble des équations suivantes :

$$\begin{cases} {}^1A_{k+1}^{ji} = {}^2A_k^{ji} \\ \dots\dots\dots = \dots\dots\dots \\ {}^{N^{ji}}A_{k+1}^{ji} = {}^{N^{ji}+1}A_k^{ji} + (1 - R^{ji})E_k^{ji} \\ {}^{N^{ji}+1}A_{k+1}^{ji} = R^{ji}E_k^{ji} \end{cases}$$

dans lequel R^{ji} désigne la fraction de longueur du dernier segment situé en début de tronçon, N^{ji} le nombre de segments entiers sur le tronçon j du carrefour i , E_k^{ji} les entrées sur le tronçon entre les instants k et $k+1$.

Equation n° 6: Expression de la proportion de voirie non bloquée par les mouvements non prioritaires

Notons S^{ij} le débit du tronçon j qui bloque l'écoulement des véhicules situés sur le tronçon j' . e^{ji} et f^{ji} caractérisent la vitesse à laquelle s'étend le blocage et sa sévérité.

$$m_k^{ji} = 1 \text{ si } X_k^{ji} + A_k^{ji} < S^{ij} \quad \text{Pour tous les autres tronçons } j' \text{ associés au carrefour}$$

i , ou si le tronçon j est au feu rouge pour la phase U_k^i ou pour la phase V_k^i ,

$$m_k^{ji} = e^{ji} m_{k-1}^{ji} + f^{ji} \quad \text{Dans les autres cas}$$

3 Méthode de régulation

3.1 Critère optimisé

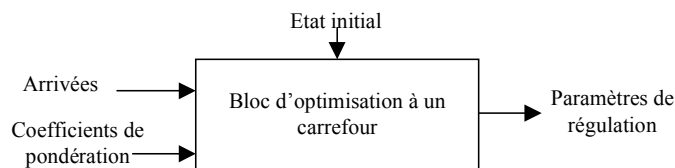
Le but de PRODYN est de minimiser le temps total perdu sur le carrefour. Ce retard est estimé en fonction de la somme des files d'attente sur tous les tronçons reliés au carrefour considéré. Comme il est impossible d'obtenir un minimum sur un temps infini, puisqu'on ne peut connaître que le futur "immédiat", PRODYN considère un horizon K de 75 secondes, soit 15 unités de temps de 5 secondes chacune, sur lequel le critère est minimisé. Le critère à minimiser, au niveau d'un carrefour i , s'écrit sous la forme :

$$J_i = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^{nb \text{ tronçons}} X_k^{ji} \right) + F_i \left(X_K^{1i}, X_K^{2i}, X_K^{3i}, X_K^{4i} \right)$$

dans lequel K est la longueur de l'horizon d'optimisation et F_i est un critère terminal représentant le revenu futur de l'instant K à l'infini.

Le bloc d'optimisation de la commande d'un carrefour est commun à toutes les versions de PRODYN (Cf. Figure 11). Il repose sur le principe de la programmation dynamique.

Figure 11 : Bloc d'optimisation à une intersection



3.2 Stratégie de régulation d'un carrefour

3.2.1 Commande des feux

La commande utilisée pour réguler le trafic est la décision de commuter ou non l'état des feux d'un carrefour à chaque pas de temps k ; le processus de commande agit donc sur la variable V_k^i .

3.2.2 Définition des contraintes

Les contraintes concernent:

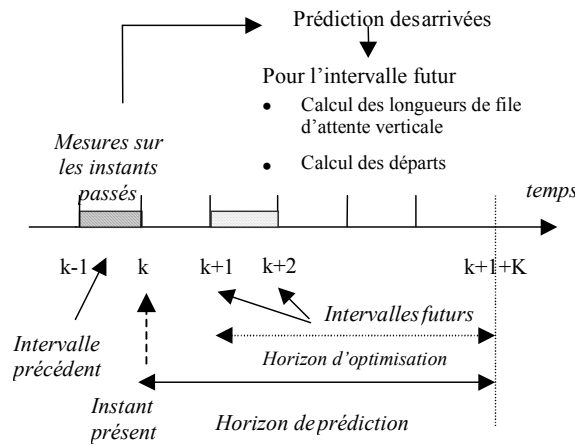
- les durées de vert maximale et minimale à respecter soit $W_k^i \leq Vert \max^i$ et $(W_k^i - Vert \min^i) V_k^i \geq 0$
- la longueur maximale des files d'attente soit $X_k^{ji} \leq X_{\max}^{ji}$
- la définition de la variable de commande V_k^i soit $V_k^i (1 - V_k^i) = 0$

En plus de ces contraintes, s'ajoutent celles liées à la prise en compte des piétons dans la détermination de la commande des feux.

3.3 Principe de l'optimisation

Le critère est optimisé en fonction de la variable de commande, en prenant en compte les équations d'état et les contraintes, sur un horizon de K pas de temps de 5 secondes. A chaque pas de temps k , l'état de feux à appliquer au pas de temps $k+1$ est calculé en fonction des mesures relatives au pas de temps précédent, par programmation dynamique (Cf. Figure 12).

Figure 12 : Principe de l'algorithme



Entre les instants k et $k+1$:

- 1) Prédiction des arrivées des véhicules pour chaque tronçon sur tout l'horizon K soit $[k, k+1+K[$
- 2) Estimation des longueurs de files d'attente à l'instant k . Prédiction des longueurs de files à l'instant $k+1$.
- 3) Prédiction des variables pour les mouvements non prioritaires bloquants.
- 4) Optimisation de la commande sur l'horizon $[k+1, k+1+K[$ pour les états fournis en 2 et 3, et arrivées en 1).

Le résultat de l'étape 4 prédit la commande à appliquer entre les instants $(k+1)t$ et $(k+2)t$. Expérimentalement, k et K ont été fixés à 5 et 75 secondes.

3.4 Les différentes versions de PRODYN

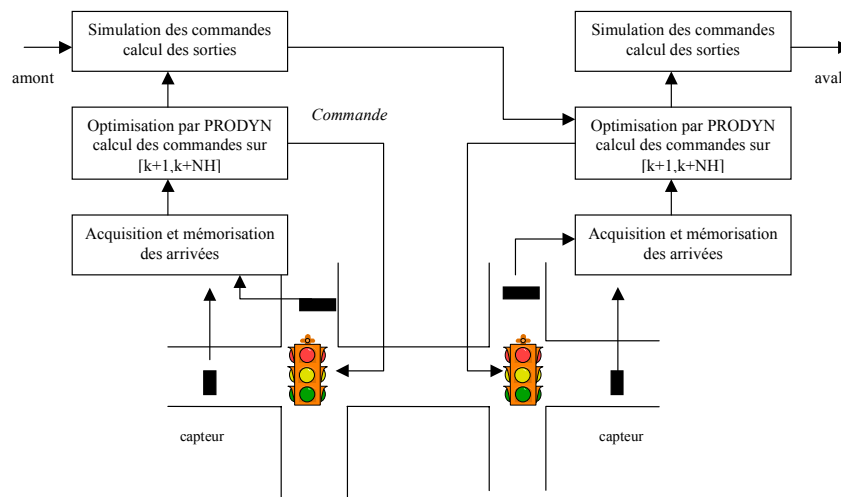
Différentes versions de PRODYN ont été développées. La première version optimise le fonctionnement d'un carrefour isolé. Les versions suivantes assurent la coordination globale d'un réseau de carrefours, par échanges d'informations entre chaque carrefour et ses voisins immédiats. Il existe deux types de coordination : l'une basée sur une coordination hiérarchisée, l'autre sur une coordination décentralisée entre carrefours voisins. N'est présentée dans cette synthèse que la version ayant conduit à une industrialisation du système [Barrière et al., 1986].

3.5 Coordination entre carrefours

PRODYN s'attache, dans un premier temps, à optimiser la régulation au niveau d'un seul carrefour isolé. La régulation d'un réseau de carrefours s'effectue grâce à des échanges d'informations. Les échanges d'informations se font uniquement entre carrefours immédiatement voisins et sont utilisés par le carrefour destinataire pour la prochaine optimisation. En d'autres termes, aucune recherche itérative de la meilleure solution globale du problème n'est effectuée.

L'approche présentée, baptisée "structure de commande avec simulation décentralisée des arrivées", consiste pour chaque carrefour, après optimisation, à simuler les commandes trouvées pour en déduire le nombre de véhicules sortant du carrefour et le transmettre aux carrefours avals (Cf. Figure 13).

Figure 13 : Structure de commande avec simulation décentralisée des arrivées



4 Evaluation

4.1 Les versions évaluées

Parmi les nombreuses versions développées, deux ont été retenues pour l'expérimentation en site réel :

- La version de PRODYN gérant des carrefours isolés,
- La version de PRODYN comprenant la procédure de coordination décentralisée permettant la commande des feux sur un réseau.

Ces deux versions ont été testées sur le site de la Zone Expérimentale et Laboratoire de Toulouse, la ZELT, la première en 1987 sur un carrefour isolé et la seconde en 1988 sur un réseau de 7 carrefours. La version industrielle de PRODYN a été testée sur la ZELT en 1989 sur un carrefour isolé et en 1990 sur un réseau de huit carrefours. Les analyses des performances numériques présentées dans les paragraphes suivants sont extraites de [Farges et al., 1990], [Khoudour et al., 1990] et [Farges et al., 1992].

4.2 Les sites

4.2.1 Le carrefour du Gorp à Toulouse

Le site choisi pour la première expérimentation de 1987 est un carrefour à trois branches, dont l'une est à sens unique entrant. Ce site correspond à l'intersection d'un axe à fort trafic (de 400 à 600 véhicules/heure dans chaque sens), la RN 113 venant de Narbone et entrant dans Toulouse, et d'une voie secondaire qui supporte un trafic

généralement faible (150 véhicules/heure en période creuse) avec néanmoins des pointes le matin (400 véhicules / heure en heure de pointe).

La campagne d'expérimentation sur le carrefour du Gorp a connu deux étapes de six semaines chacune, effectuées respectivement d'avril à juin et de septembre à novembre 1987. Durant chacune de ces deux étapes, trois stratégies (plans fixes calculés par TRANSYT, Intervalle Véhicule et PRODYN) ont été testées durant six journées réparties sur deux semaines, à différentes périodes de la journée.

4.2.2 Le carrefour du Midi à Toulouse

Le carrefour isolé choisi pour l'expérimentation de la version industrielle de PRODYN en automne 1989 est le carrefour du Midi qui fait partie du réseau de la ZELT. Il est situé à l'intersection de l'avenue Crampel et de la rue du Midi. L'avenue Crampel est une artère à double sens de circulation supportant un trafic inter-zones assez élevé (19 000 véhicules/jour). La rue du Midi est une pénétrante à double sens supportant un trafic inter-quartiers assez dense aux heures de pointe du matin et du soir.

4.2.3 Réseau de carrefours à Toulouse: 1^{ère} évaluation

La première zone de test de PRODYN est un réseau de 7 carrefours représentant la partie Nord de la ZELT. La campagne d'évaluation s'est déroulée en deux étapes : au printemps pendant deux semaines et en automne pendant quatre semaines. Durant les deux périodes, PRODYN a été comparé à une régulation par plans de feux fixes optimisés, avec trois configurations de trafic différentes: pointe du matin, heures creuses de l'après-midi, pointe du soir.

4.2.4 Réseau de carrefours à Toulouse: 2^{ème} évaluation

C'est la version industrielle de PRODYN qui est testée sur cette deuxième zone de 8 carrefours comprenant, outre les 7 carrefours définis précédemment, le carrefour du Midi. PRODYN a été comparé à la stratégie opérationnelle dans la Ville de Toulouse, en y incluant les interventions éventuelles des exploitants. Cette expérimentation s'est déroulée sur 36 jours, à raison de 12 jours par stratégie. La période d'expérimentation, de 16h30 à 18h, correspond principalement à la montée en charge de la pointe du soir.

4.3 Les résultats

Les critères d'évaluation des stratégies testées sont les temps de parcours, les arrêts dans les files d'attente et la consommation de carburant. Les arrêts sont comptabilisés aux feux. Les temps de parcours sont calculés sur les différentes origines-destinations pré-définies.

4.3.1 Evaluation de PRODYN sur les carrefours isolés de Toulouse

Les résultats de l'évaluation de PRODYN sur le carrefour isolé du Gorp sont présentés dans les Tableau 12 et Tableau 13 [Khoudour, et al., 1990].

Par rapport à la stratégie Intervalle Véhicule, quelque soit la période, PRODYN est plus efficace (réduction de 3% du temps de parcours). Par rapport au Cycle Fixe,

l'efficacité n'est démontrée que pour la période de pointe du matin 8h / 9h. Pour les autres périodes, les différences ne sont pas significatives.

En terme de nombre d'arrêts, PRODYN est plus efficace par rapport à la stratégie Intervalle Véhicule quelque soit la période. Par rapport à un Cycle Fixe, PRODYN n'est efficace que pour la période de pointe du matin. En ce qui concerne les autres périodes, les performances sont peu concluantes ; la dégradation des résultats par rapport aux plans de feux calculés par TRANSYT s'explique par le fait que le critère d'optimisation de PRODYN est le temps de parcours et non le nombre d'arrêts.

Tableau 12 : Comparaison du temps de parcours sur le carrefour du Gorp (en véh.h/h)

Période	8 h - 9 h	9 h 30 - 11 h	18 h 30 - 19 h 30
Intervalle Véhicule	17,5	14,5	17,1
Prodyn	17,0	14,0	16,6
Cycle fixe	17,8	14,1	16,3
Prodyn/Intervalle Véhicule	3%	3%	3%
Significativité	84%	98%	63%
Prodyn/Cycle fixe	4%	1%	-2%
Significativité	93%	16%	51%

Tableau 13 - Comparaison du nombre d'arrêts sur le carrefour du Gorp

Période	8 h - 9 h	9 h 30 - 11 h	18 h 30 - 19 h 30
Intervalle Véhicule	858	1016	807
Prodyn	809	915	780
Cycle fixe	839	867	699
Prodyn/Intervalle Véhicule	6%	10%	3%
Significativité	80%	99%	51%
Prodyn/Cycle fixe	4%	-6%	-12%
Significativité	58%	91%	98%

Les données recueillies lors de cette expérience ont été ré-utilisées en 1989 pour analyser les consommations énergétiques. Deux modèles de consommation ont été utilisés : le premier considère uniquement les temps de parcours, le second prend également en compte les nombres d'arrêts.

Le premier modèle fournit des résultats très similaires à ceux obtenus sur les temps de parcours. Les résultats du second modèle sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 14).

Tableau 14 – Consommations (en l/100 km)

Période	8 h - 9 h	9 h 30 - 11 h	18 h 30 - 19 h 30	Toutes périodes
Intervalle Véhicule	13,88	12,95	12,81	13,17
Prodyn	13,53	12,43	13,15	12,95
Cycle fixe	13,95	12,48	12,68	12,97
Prodyn/Intervalle Véhicule	2,5%	4%	-2,5%	2%
Significativité	72%	99%	55%	77%
Prodyn/Cycle fixe	3%	0,5%	-3,7%	0,15%
Significativité	83%	24%	72%	12%

L'analyse des auteurs de l'article [Khoudour, Lesort, Farges, 1990] fait ressortir que les moins bonnes performances de PRODYN sur les nombres d'arrêts à comparer aux temps de parcours se reportent sur la consommation. Néanmoins la hiérarchie entre les stratégies est inchangée.

L'évaluation du système PRODYN sur le carrefour du Midi en 1989, réalisée sur un seul créneau horaire et comparant PRODYN à une stratégie adaptative classique a donné les résultats récapitulés dans le Tableau 15 [Farges, Kamdem, Lesort, 1991]. Les différences importantes observées entre ces deux expérimentations successives s'expliquent ainsi:

- Les carrefours du Gorp et du Midi sont très différents l'un de l'autre. Le carrefour du Gorp utilisé en 1987 s'est révélé peu favorable à une régulation adaptative. Les mauvais résultats de la stratégie Intervalle - Véhicule comparée au cycle fixe en sont la preuve.
- Quelques améliorations ont été apportées à PRODYN entre les deux expériences.

Tableau 15 - Evaluation de PRODYN sur le carrefour du Midi

Indicateur	Temps passé (veh. h / h)	Nombre d'arrêts (veh.)
Stratégie ville	23,06	1291
Prodyn	21,09	1316
Différence relative	9%	-2%
Taux de significativité	85%	35%

4.3.2 Évaluation des réseaux à Toulouse

Les résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation menée sur le réseau de sept carrefours en 1988 sont résumés dans le Tableau 16 [Khoudour, Farges, 1990]. PRODYN fournit une régulation de meilleure qualité que celle de TRANSYT, quelles que soient les périodes considérées. Globalement, PRODYN réduit de 10% le temps de parcours par rapport à TRANSYT, ce qui correspond à une diminution de 12 % des retards.

Les résultats mettent en évidence la grande diversité des performances des différentes stratégies sur ces itinéraires ; si une hiérarchisation très nette apparaît sur certains itinéraires, d'autres ne permettent aucune discrimination entre les stratégies. D'autres encore ne permettent cette discrimination que pendant certaines périodes horaires.

Tableau 16 - Comparaison du temps de parcours sur le réseau (en véh. h/h)

Période	8 h - 9 h	15 h - 16 h15	16h45 - 18h	Total
Cycle fixe	75	62	83	73
PRODYN	66	58	76	66
Différence	12%	6%	8%	10%
Taux de significativité	95%	85%	95%	99,99%

Les résultats obtenus dans le cadre de l'expérimentation menée sur le réseau de huit carrefours en 1990 sont résumés dans le Tableau 17 [Farges, Khoudour 1992].

Ce tableau présente les temps de parcours moyens sur l'ensemble du réseau obtenus avec la régulation opérationnelle dans l'agglomération en 1984, en 1990 et avec PRODYN. Les temps de parcours ont été établis à partir des temps de parcours individuels de véhicules (environ 160000) obtenus par enquête minéralogique en 14 points du réseau. Ces résultats incluent une correction des variations de la demande.

Une analyse par itinéraire a également été réalisée. Elle montre des résultats très contrastés. Ces résultats sont détaillés dans l'article.

Tableau 17- Comparaison du temps de parcours sur le réseau (en s/km)

Stratégie	Temps de parcours	Gain / Ville 84	Taux de significativité	Gain / Ville 90	Taux de significativité
Ville 1984	398	-	-	-	-
Ville 1990	380	5%	85%	-	-
PRODYN	368	8%	95%	3%	70%

5 Récapitulatif des caractéristiques

Pays de développement	France
Zone sous contrôle	Réseau décrit par un ensemble de chaînons et de nœuds
Type de modélisation de trafic	Macroscopique (discrétisation des chaînons)
Origine des données de trafic	<u>En ligne</u> : les capteurs implantés en début de chaînon; de manière optionnelle les capteurs en milieu et en fin de chaînon. <u>Fréquence des mesures</u> : toutes les 5 secondes
Définition du critère de performance	Minimiser le temps total perdu sur un carrefour: somme des files d'attente.
Prise en compte des interactions entre carrefours adjacents	Échanges d'informations entre contrôleurs locaux adjacents.
Technique d'adaptation au trafic	Détermination des instants de commutation de l'état des feux au niveau local. Remise en cause de la décision de commutation toutes les 5 secondes.
Paramètres optimisés	Notions conventionnelles de plans de feux abandonnées. Utilisation d'instant de commutation.
Durée de cycle	Notion abandonnée
Prédictions	Horizon d'optimisation de 75 secondes divisé en 15 unités de temps de 5 secondes chacune.
Technique d'optimisation	Programmation Dynamique et horizon glissant.
Fréquence d'optimisation	Toutes les 5 secondes.
Architecture de régulation	<u>Décentralisée</u> : échanges d'informations entre contrôleurs voisins.

6 Récapitulatif des variables utilisées par Prodyn

Capteurs utilisés	Boucles magnétiques, implantées en amont, à 50 mètres de la ligne de feux et sur la ligne de feux.
Variables mesurées en temps réel	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Capteurs en amont</u> du tronçon fournissent le nombre de véhicules en entrée du tronçon, à chaque unité de temps. rôle: a) calcul du nombre de véhicules dans le premier segment du tronçon, b) pour le premier pas de temps, prédiction des arrivées futures au niveau de la ligne de feux. C) Pour les autres pas de temps de l'horizon, estimation des files d'attente verticales. ▪ <u>Capteurs implantés à 50 mètres de la ligne de feux</u>, fournissent une valeur de débit rôle: estimation des files d'attente verticales. ▪ <u>Capteurs implantés sur la ligne de feux</u>, détectent la présence d'un véhicule. rôle: contraindre la durée de rouge maximum visible par un usager en attente.
Fréquence des mesures	Toutes les 5 secondes
Variables mesurées puis figées	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Débit de saturation</u> rôle: intervention dans l'équation d'évolution des files d'attente. ▪ <u>Pourcentage de mouvements tournants</u> rôle: réalisation de la coordination inter - carrefours. ▪ <u>Temps de parcours d'un tronçon</u> rôle: modélisation des arrivées dans la file d'attente. ▪ <u>Nombre de véhicules tournant à gauche</u> rôle: utilisé dans la modélisation de la file d'attente verticale, s'il existe un temps d'attente avant l'écoulement de ces véhicules.

Variables modélisées	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Temps de vert écoulé depuis la dernière commutation</u> rôle: satisfaction des contraintes de durées de vert min et max ▪ <u>Phase ayant le vert</u> rôle: modélisation de la file d'attente verticale ▪ <u>Nombre de véhicules en mouvement sur un tronçon</u> ▪ <u>Longueur de la queue verticale, exprimée en nombre de véhicules</u> rôle: influence directe sur le critère à optimiser ▪ <u>Départs d'un tronçon</u> rôle: modélisation de la file d'attente verticale ▪ <u>Mouvements tourne à gauche stockés dans le carrefour</u> rôle: modélisation de la file d'attente verticale
Variables prédites	<p><u>Arrivées sur un tronçon sur l'horizon d'optimisation</u> rôle : modélisation de la file d'attente verticale</p> <p>régulation coordonnée de plusieurs intersections, les arrivées dans le premier segment d'un tronçon sont une proportion des départs des autres tronçons.</p>
Variables de commande	Etats des feux sur l'horizon, recalculés toutes les 5 secondes.
Critère à optimiser	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Objectif</u> : minimiser le temps total perdu sur le carrefour. ▪ <u>Critère optimisé</u> : somme des files d'attente sur tous les tronçons connectés au carrefour sous contrôle, sur tout l'horizon ▪ <u>Horizon</u> : 75 secondes soit 15 unités de temps ▪ <u>Fréquence d'optimisation</u> : toutes les 5 secondes

7 Bibliographie

- Barrière (J.F.), Farges (J.L), Henry (J.J.). - Decentralization vs Hierarchy in Optimal Traffic Control. *5th IFAC, IFIP, IFORS Conference on Control in Transportation Systems*, 1986, pp 321 - 326.
- Farges (J.L.). – Commande du trafic urbain par programmation dynamique et méthodes hiérarchisées. Thèse de Docteur Ingénieur, Toulouse, France, 1983.
- Farges (J.L.), Khoudour (L.), Lesort (J.B.). - PRODYN: On Site Evaluation. *IEE Conference*, Publication N° 320, 1990, pp 62-66.

- Farges (J.L.), Khoudour (L.), Lesort (J.B.), Laffont (P.). – Efficacité et vieillissement des systèmes de feux de circulation. Quel enjeu pour l'adaptativité ?. *Recherche Transports Sécurité* N°35, septembre 1992, pp 3-12.
- Farges (J.L.), Kamdem (I.), Lesort (J.B.). - Realization and Tests of a Prototype for Real Time Urban Traffic Control. *Proceedings of the DRIVE Conference*, Vol. 1, Brussels, 1991, pp 527-542.
- Henry (J.J.), Farges (J.L.), Tuffal (J.). - The PRODYN Real Time Traffic Algorithm. *4th IFAC, IFIP, IFORS Conference on Control in Transportation Systems*, Baden Baden, 1983, pp 307 - 312.
- Henry (J.J.), Farges (J.L.). – PRODYN. *Control, Computers, Communications in Transportation, 6th IFAC Symposia series*, 1990, N° 12, pp 253 - 255.
- Henry (J.J.), Farges (J.L.). - P.T. Priority and PRODYN. *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, Paris, France, 30 November - 3 December 1994, pp 3086-3093.
- Kessaci (A.), Farges (J.L.), Henry (J.J.). - *On-line Estimation of Turning Movements and Saturation Flows in PRODYN*.
- Kessaci (A.), Farges (J.L.), Henry (J.J.). - Upper Level for Real Time Urban Traffic Control Systems. *11th IFAC world congress of Automatic Control in Service of Mankind*, V10, Tallinn, Estonia, USSR, pp 226 - 229.
- Khoudour (L.), Lesort (J.B.), Farges (J.L.). – Prodyn: Trois ans d'expérimentation sur la ZELT. *Recherche Transports Sécurité* N°28, décembre 1990, pp 89-98.
- Olivero (P.). - ZELT: State of the Activity and Further Developments. *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, Paris, France, 30 November - 3 December 1994, pp 611-618.
- Vanderborght (F.). – PRODYN in Brussels. *Traffic Technology International*, Spring 1995, pp 98-102.

Chapitre V

OPAC

1 Introduction

1.1 Le système

OPAC-RT, *Real Time Optimization Policies for Adaptive Control*, a été conçu en 1982 dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Lowell, Massachusetts, et le département américain des Transports. Le système a été testé dans la ville d'Arlington, en Virginie, et dans la ville de Tuscon, en Arizona.

1.2 Les caractéristiques

La stratégie de commande mise en œuvre consiste, à chaque instant, à se demander si l'on change d'état de feu – .i.e. si le feu est commuté d'un état vert dans un état rouge et vice versa - et non pas à tenter d'optimiser séparément les paramètres caractéristiques des plans de feux. Cette stratégie travaille sur un horizon de temps fini et prédit sur cet horizon les commutations futures. Les notions classiques relatives aux plans de feux ne sont plus utilisées. Ce système n'est, à notre connaissance, appliqué qu'au niveau local d'un carrefour isolé.

2 Modélisation de trafic

2.1 Représentation du carrefour

Le carrefour est décomposé en un certain nombre de tronçons sur lesquels l'écoulement du flux de trafic est unidirectionnel. Son espace interne est considéré comme ponctuel.

2.2 Les capteurs

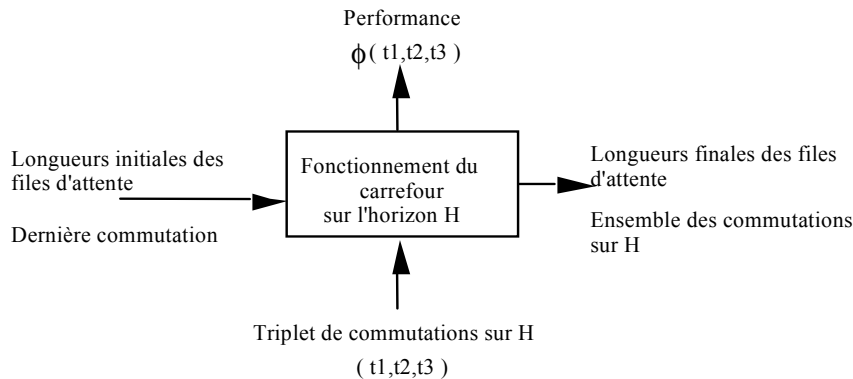
Ce sont des boucles magnétiques, placées en début de chaque tronçon relié au carrefour sous contrôle. Elles permettent de mesurer les débits entrant sur les tronçons.

2.3 Modèle d'écoulement

OPAC s'appuie sur une modélisation macroscopique du trafic ; l'écoulement du trafic consiste en la génération puis la décharge des files d'attente verticales en fonction de l'état des feux et des arrivées en début de chaque tronçon.

Considérons un carrefour isolé à deux phases. Toutes les arrivées au niveau du carrefour sont connues sur un horizon H de longueur finie, variant de 50 à 100 secondes. L'horizon est découpé en un nombre fini de pas de temps d'une durée de 5 secondes. Le fonctionnement du carrefour sur l'horizon H est représenté sur la Figure 14.

Figure 14 : Fonctionnement du carrefour sur l'horizon H



A partir de la connaissance des longueurs initiales des files d'attente, de la date de la dernière commutation de chaque feu, et d'un triplet de commutations des feux sur H l'indice de performance du carrefour, noté ϕ , est calculé. Le modèle permet de fournir, pour le triplet de commutations retenu, les longueurs finales des files d'attente en fin d'horizon H .

3 Méthode de régulation

3.1 Critère optimisé

Le critère optimisé est le temps total d'attente sommé sur tous les tronçons connectés au carrefour et sur chaque pas de temps composant l'horizon H .

Soient les notations suivantes :

- (t_1, t_2, t_3) désigne un triplet de commutations de feux sur l'horizon H , aux instants t_1, t_2, t_3 , définis sur l'horizon.
- Q_0 est la file d'attente initiale.
- A_j représente les arrivées pendant l'intervalle j .

- D_j représente les départs pendant l'intervalle j . Notons que les départs dépendent des différents instants de commutation des feux t_1, t_2, t_3 .
- k est le nombre d'intervalles de 5 secondes sur H .

L'indice de performance du carrefour est noté $\phi(t_1, t_2, t_3)$; il représente le coût lié aux commutations aux instants t_1, t_2, t_3 , qui sont bien sûr des multiples du pas de temps de 5 secondes. Il est calculé comme suit :

$$\phi(t_1, t_2, t_3) = \sum_{j=1}^k (Q_0 + A_j - D_j)$$

D'après Gartner [Gartner, 1984], ce coût représente le temps total d'attente au carrefour. Or, le temps total d'attente au niveau du carrefour sur l'horizon H s'exprime par

$$\sum_{j=1}^k Q_j = \sum_{j=1}^k (Q_{j-1} + A_{j-1} - D_{j-1}) \quad \text{soit} \quad \sum_{j=1}^k Q_j = \sum_{j=1}^k \left(Q_0 + \sum_{i=0}^{j-1} (A_i - D_i) \right)$$

Pour que le critère défini par Gartner représente le temps total d'attente, il faudrait interpréter A_j et D_j comme les arrivées et les départs cumulés entre l'instant 0 et l'instant $j-1$, ce qui néanmoins n'est pas la définition qu'en donne Gartner dans ses articles.

3.2 Optimisation

Trois versions successives de la procédure d'optimisation ont été développées dans OPAC :

- *Version 1*: Développement d'une procédure standard d'optimisation fournissant une stratégie de commande optimale. C'est la Programmation Dynamique.
- *Version 2*: Modification de la Programmation Dynamique, définie précédemment pour une application temps réel.
- *Version 3*: Introduction de la notion d'horizon glissant. C'est cette dernière version qui est utilisée dans la version industrielle d'OPAC.

3.2.1 Version 1: Programmation Dynamique

Soit l'état du carrefour au pas de temps i . L'indice de performance du carrefour est calculé dans les deux cas suivants : commutation et pas de commutation de l'état de feux à l'instant i . La décision - commutation ou pas de commutation - conduisant au minimum de l'indice de performance est appliquée.

Les mêmes opérations sont effectuées pour le pas de temps suivant $i+1$. Ainsi, l'ensemble des commutations sur l'horizon H est obtenu lorsque tout l'horizon a été parcouru. Cette méthode est extrêmement coûteuse en temps de calcul et peu envisageable pour une application temps réel.

3.2.2 Version 2: la Pseudo-Programmation Dynamique

La version précédente de la Programmation Dynamique a été simplifiée en vue d'une application temps réel. L'horizon d'optimisation, d'une longueur variant entre 50 et 100 secondes, est découpé en pas de temps de 5 secondes. Une commutation des feux

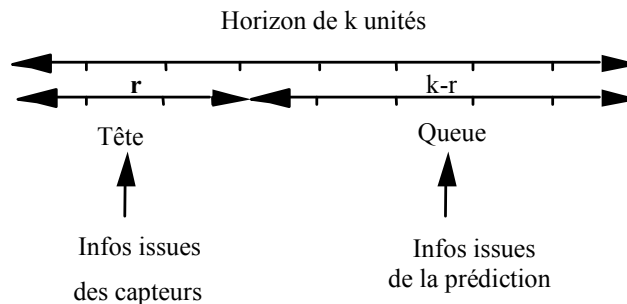
est opérée au moins une fois et au plus trois fois sur toute la durée de l'horizon. L'optimisation consiste en une recherche séquentielle sous contrainte; la fonction de coût est évaluée de manière séquentielle, pour toutes les séquences de commutation possibles. La séquence optimale est celle qui minimise la fonction de coût. Une telle technique de recherche de la commande optimale est également coûteuse en temps de calcul car elle consiste à passer en revue tous les instants de commutation possibles.

3.2.3 Version 3 : Optimisation par "horizon glissant"

L'un des inconvénients des méthodes précédentes est qu'elles supposent que les arrivées soient connues sur tout l'horizon H . La précision avec laquelle les arrivées sont estimées ou prédites influe sur la qualité de la commande : plus la prédiction est lointaine dans le futur, plus la précision de la prédiction décroît et moins la commande des feux est adaptée à l'état du trafic. C'est pourquoi le concept de *l'horizon glissant* a été introduit. L'horizon de longueur k unités est découpé en deux parties (Cf. Figure 15):

- une partie appelée "*tête*", située au début de l'horizon. Les données sont ici issues des capteurs.
- une partie appelée "*queue*", située en fin d'horizon. Les données sont ici issues de prédictions, fournies par un modèle du trafic.

Figure 15 : Découpage de l'horizon



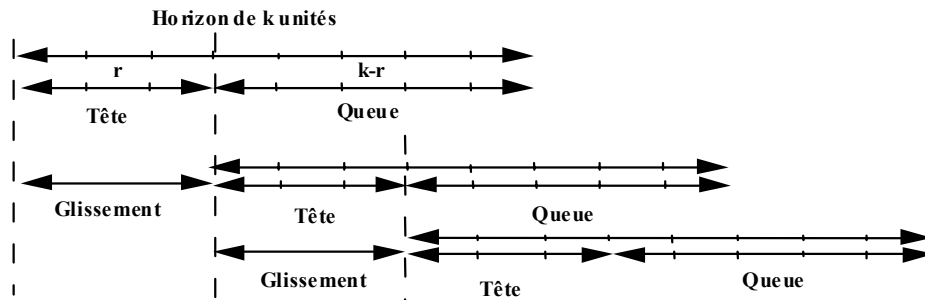
La technique d'optimisation se décompose en trois étapes:

- 1) Détermination des longueurs des parties "*tête*" et "*queue*" de l'horizon.
- 2) Recueil des données issues des capteurs. Calcul des flux pour les $(k-r)$ prochains intervalles, en fonction du modèle d'écoulement et des données recueillies par les capteurs au cours des « r » premiers pas de temps.
- 3) Calcul de la séquence optimale des commutations par la méthode de Pseudo Programmation Dynamique.

Les états des feux correspondant aux r premiers intervalles sont appliqués sur le carrefour.

L'horizon est ensuite décalé de r intervalles de temps (Cf. Figure 16) et l'optimisation est relancée.

Figure 16 : Horizon glissant



4 Évaluation

4.1 Première campagne de test

Le carrefour sous contrôle se situe au croisement de North George Mason Drive et de Nord 16th Street, à Arlington, Virginie [Gartner, 1991]. Le trafic s'y écoule en deux phases, dont l'une est à plusieurs voies. La stratégie de régulation appliquée est la micro-régulation. Le volume de trafic est faible à modéré.

Les détecteurs sont situés à 180 mètres en amont de la ligne de feux. L'horizon d'optimisation est découpé en 12 intervalles de temps soit 48 secondes, la durée d'un pas de temps étant fixé à 4 secondes. La partie "tête" de l'horizon ne dure que 3 pas de temps.

La stratégie de régulation OPAC est comparée à la technique de régulation par micro-régulation. Les critères de comparaison sont les retards, les arrêts et la durée de cycle.

Avec la stratégie de micro-régulation, un retard moyen de 6,29 secondes est observé sur le carrefour. Avec OPAC, les retards s'élèvent à 6,04 secondes soit une réduction de 3,9%. En terme de pourcentage du nombre d'arrêts, OPAC conduit à une réduction de 1,6%, mais cette réduction n'est pas significative. D'un point de vue de la durée de cycle, la valeur moyenne obtenue par micro-régulation est de 40 secondes. OPAC conduit à un cycle d'une durée de 44 secondes en moyenne, soit une augmentation de 10%.

4.2 Deuxième campagne de test

Le carrefour sous contrôle est située au croisement de Flowing Wells Road et de Prince Road, à Tuscon, en Arizona. Le trafic s'y écoule en deux phases, toutes deux étant à plusieurs voies. Le volume de trafic est modéré. Le carrefour est régulé par micro-régulation.

L'horizon d'optimisation est découpé en 15 pas de temps soit 60 secondes, la durée d'un pas de temps étant fixé à 4 secondes. La partie "tête" de l'horizon représente 3 pas de temps.

Avec la stratégie de micro-régulation, les retards s'élèvent en moyenne à 15,81 secondes. Avec OPAC, ils s'élèvent à 13,29 secondes, malgré une augmentation observée de 4,1% des débits lors de cette évaluation, soit une réduction de 15,9% des retards. En terme de pourcentage de nombre d'arrêts, une augmentation de 3,9% a été observée avec OPAC. D'un point de vue de la durée de cycle, la durée moyenne obtenue par micro-régulation est de 86 secondes, avec OPAC elle est de 55 secondes.

4.3 Troisième campagne de test

Le carrefour sous contrôle est situé au croisement de Flowing Wells Road et de Prince Road, à Tuscon, en Arizona [Gartner, 1991]. Il s'agit du carrefour précédent qui a été transformé en un carrefour à huit phases (la définition de phase est ici celle des anglo-saxons). L'horizon de prédiction comprend 20 pas de temps, de 5 secondes chacun, soit 100 secondes. La partie "tête" de l'horizon représente 3 pas de temps soit 15 secondes.

Les retards s'élèvent à 19,23 secondes en moyenne avec OPAC. Avec la stratégie de micro-régulation, ils atteignent 20,82 secondes. OPAC conduit donc à une réduction de 7,7 %. OPAC réduit de 9,5% le nombre d'arrêts. La durée de cycle obtenue par micro-régulation est de 110 secondes, elle est de 80 secondes avec OPAC.

4.4 Quatrième campagne de tests

Les performances d'OPAC ont été comparées à celles d'un système de régulation par plans de feux fixes optimisés, sur deux sites le long de la « New Jersey Route 18 ». Le premier site est une artère à double sens, d'une longueur de 17 km et située entre Hillsdale Road et Naricon Place, dans le New Brunswick. Le second site est le carrefour situé au croisement de la Route 18 et de Commercial Avenue.

L'évaluation porte sur des données recueillies pendant 2 semaines, une semaine pendant laquelle les feux sont régulés par le système à feux fixes et la seconde pendant laquelle OPAC est opérationnel. Elle n'inclut ni les week-ends, ni les lundis et vendredis après-midi à cause de l'influence possible des retours et départs de week-ends. Les quatre créneaux horaires suivant ont été considérés :

- Heures creuses du matin, entre 4:00 et 6:00,
- Heures de pointe du matin, entre 6:45 et 8:00,
- Heures de pointe du soir, entre 16:00 et 18:45,
- Heures creuses du soir, entre 20:00 et 22:00.

Premier site : Artère à double sens

Le Tableau 18 récapitule les performances d'OPAC le long de l'artère. Les conclusions suivantes peuvent être tirées de l'analyse du tableau:

- OPAC ne conduit à aucune réduction des temps de parcours et nombre d'arrêts pendant les périodes de pointe du matin.
- Dans le sens Nord-Sud, et pendant les périodes de pointe du soir, OPAC réduit respectivement les temps de parcours et nombre d'arrêts de 25,6% et 55,4%.
- OPAC réduit dans les deux sens les temps de parcours pendant les heures creuses du soir.
- Pour les autres créneaux horaires, les résultats ne montrent pas d'amélioration significative des conditions de circulation, en comparaison à une régulation par plans de feux fixes.

Tableau 18 - Comparaison des performances d'OPAC le long de l'artère avec un système à feux fixes

Variation en % des temps de parcours et nombre d'arrêts				
Créneau horaire	Direction Nord-Sud		Direction Sud-Nord	
	Temps de parcours	Nombre d'arrêts	Temps de parcours	Nombre d'arrêts
De 4 :00 à 6 :00	NS*	NS*	NS*	NS*
De 6 :45 à 8 :00	NS*	NS*	NS*	NS*
De 16 :00 à 18 :45	- 25,6%	- 55,4%	NS*	NS*
De 20 :00 à 22 :00	- 4,4%	NS*	- 6,9%	NS*

* différence non significative. Un pourcentage négatif signifie une amélioration liée à OPAC

Deuxième site : Carrefour au croisement de Hillsdale Road et Naricon Place

Les résultats de la comparaison d'OPAC à un système de régulation par plans de feux fixes pour le carrefour situé à l'intersection de la « Route 18 » et de la Commercial Avenue sont récapitulés dans le Tableau 19.

La comparaison n'est valable que pour le créneau horaire 10:00 – 12:45. Elle s'appuie sur l'estimation des retards et pourcentages d'arrêts. Ces estimations sont calculées toutes les 7 minutes pour les deux sens principaux de traversée du carrefour à savoir les directions nord-sud et ouest-est.

Les résultats montrent qu'OPAC réduit de manière significative les retards dans la direction nord-sud, sans dégrader l'axe ouest-est. De manière plus globale, OPAC conduit à une réduction de 21,2% des retards.

Tableau 19 - Comparaison des performances d'OPAC pour la régulation du carrefour à feux

		Direction Nord-Sud		Direction Ouest-Est	
		Temps fixe	OPAC	Temps fixe	OPAC
<i>Retards</i>	Moyenne, sec	7,59	4,72	34,18	35,39
Réduction		Réduction de 39,7%		Non significatif	
<i>Arrêts</i>	Moyenne, %	31,7	31,2	73,65	77,89
Réduction		Non significatif		Non significatif	

5 Récapitulatif des caractéristiques

Pays de développement	Etats Unis
Zone sous contrôle	Carrefour isolé
Type de modélisation du trafic	<u>Macroscopique pour le réseau</u> : gestion de files d'attente verticales
Origine des données de trafic	<u>En ligne</u> : les capteurs implantés en début de tronçon Données exploitées dans la partie "tête" de l'horizon d'optimisation. Réactualisation toutes les 5 secondes.
Définition du critère de performance	Minimiser les temps d'attente sur le carrefour
Technique d'adaptation au trafic	Détermination des instants de commutation de l'état des feux au niveau local.
Paramètres optimisés	Notions conventionnelles de plans de feux abandonnées Utilisation d'instant de commutation
Durée de cycle	Notion abandonnée
Prédictions	Découpage de l'horizon d'optimisation en "tête" et "queue". Horizon de longueur variant entre 50 et 100 secondes. Prédictions sur la partie "queue"
Technique d'optimisation	Programmation Dynamique et horizon glissant : recherche du triplet d'instant de commutation parmi tous ceux possibles qui minimisent le critère.
Fréquence d'optimisation	Fonction de la durée de l'horizon glissant (en particulier de la partie " tête " et du pas de temps)
Architecture de régulation	Décentralisée: régulation au niveau de chaque carrefour. Pas de prise en compte des interactions entre carrefours adjacents de chaque carrefour.

6 Bibliographie

- Andrews (C.M), Elahi (S.M), Clark (J.E). – Evaluation of New Jersey Route 18 OPAC/MIST Traffic-Control System. *Transportation Research Record 1603*, pp 150-155.
- Chen (H.), Cohen (S.L.), Gartner (N.H.), Liu (C.C.). - Simulation Study of OPAC: A Demand-Responsive Strategy for Traffic Signal Control. *Transportation and Traffic Theory*, Elsevier Science Publishing Co., N.H. Gartner a,d N. H. M. Wilson Editors, pp 233-249.
- Gartner (N. H.). - Prescription for Demand Responsive Urban Traffic Control. *Transportation Research Record 881*, pp 73 - 76.
- Gartner (N. H.). – Development of Demand-Responsive Strategies for Urban Traffic Control. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, pp 166-174, Edited by A.V. Balakrishnan and M. Thomas, Springer-Verlag, 1984.
- Gartner (N. H.). - Development and Testing of a Demand Responsive Strategy for Traffic Signal Control. *American Control Conference*, 1982.
- Gartner (N. H.). OPAC: Strategy for Demand Responsive Decentralized Traffic Signal Control. *Control, Computers, Communication*, 1990, pp 241-244.
- Gartner (N. H.), Tarnoff (P.J.), Andrews (C.M.). - Evaluation of the Optimized Policies for Adaptative Control (OPAC) Strategy. *Transportation Research Record*, 1991, (1324) pp 105-114.
- Gartner (N. H.), Stamatiadis (C.), Tarnoff (P.J.). - Development of Real Time Traffic Adaptive Control Strategies for IVHS. *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, Paris, France, 30 November - 3 December 1994, pp 423-430.

Chapitre VI

Autres systèmes

1 MOVA

1.1 Le système

Développé dans les années 80 par le TRRL (Traffic and Road Research Laboratory), Grande Bretagne, pour le compte du ministère britannique de l'Environnement, du Transport et des Régions, MOVA - *Microprocessor Optimised Vehicle Actuation* - s'applique à mettre en œuvre de la micro-régulation, au niveau de carrefours isolés.

1.2 Les capteurs

La régulation s'appuie sur des données fournies par des capteurs de type boucle magnétique. Chaque tronçon est équipé de deux capteurs par voie, l'un à 40 mètres en amont de la ligne de feux, l'autre à 100 mètres. Le deuxième permet la détection de conditions de trafic saturées.

1.3 Méthode de régulation

Initialement, chaque tronçon reçoit suffisamment de vert pour que la file d'attente, remontant jusqu'au premier capteur, puisse se décharger. Les intervalles entre deux véhicules successifs sont ensuite mesurés en vue d'estimer l'instant où le débit devient inférieur au débit de saturation. Cette estimation est fournie à un module d'optimisation qui prend la décision soit d'augmenter la durée de vert soit d'arrêter les véhicules par un feu rouge sur la base d'une minimisation des retards et des arrêts. De telles modifications peuvent être apportées à chacune des phases et ainsi conduire à un escamotage. Le cas d'un tronçon saturé où la file d'attente ne s'écoule pas pendant le cycle est reconnu par MOVA. Dans un tel cas, MOVA change automatiquement de politique pour choisir une méthode maximisant la capacité.

1.4 Evaluation du système

L'évaluation du système a eu lieu, en Grande Bretagne, sur les sites de :

- Reading, sur l'A329, vers Wokingham,
- Bath, à l'intersection de Cleveland Place et de London Road,
- Bournemouth, au carrefour appelé "Cemetery Junction", situé sur l'A347 vers Wimborne.

Le trafic journalier est caractérisé par:

- un fort trafic pendant les heures de pointe du matin et du soir, pour le site de Reading. Les véhicules de type poids lourd sont peu nombreux.
- un flux continu entre 8h et 18h pour le site de Bath. Le trafic présente une forte proportion de véhicules de type poids lourd.
- un fort trafic pendant les heures de pointe pour le site de Bournemouth. Les véhicules légers sont en forte proportion.

MOVA est comparé au système de régulation “D-System Vehicle Actuated”, méthode classique de régulation des feux en Grande Bretagne. Les retards ont été mesurés par des enquêteurs pendant quatre périodes de 90 minutes par jour, sur 10 jours avec MOVA, puis 10 autres jours avec “D-System VA”. Le retard moyen par véhicule et par période a été calculé. Les résultats montrent des gains de l’ordre de -7 à +20 % sur la pointe du matin, de +9 à +30 % en fluide et de +5 à +12% en pointe du soir. Lors de l’analyse des résultats, l’accent a également été mis sur l’aspect sécuritaire de MOVA. Le critère d’évaluation est alors le nombre de véhicules franchissant la ligne de feux, à la fin de la durée de vert. MOVA conduit à une réduction de 5% de ce nombre pendant les 3 secondes d’orange et de 25% pendant les 3 premières secondes de rouge.

Une étude très récente a été menée pour évaluer les performances de MOVA au niveau d’un rond-point, implanté à Leicester. Cette expérience est décrite dans un article de la revue « *Veille Transports Intelligents* ».

La partie Est d’un des principaux échangeurs permettant d’entrer dans Leicester est contrôlée par des feux de circulation aux heures de pointe. Des feux contrôlés par MOVA sont utilisés pour réguler la circulation qui entre sur le rond-point. Les résultats de l’étude indiquent une réduction notable des ralentissements, une augmentation de capacité, et d’autres bénéfiques, dont un meilleur contrôle des files d’attente sur les bretelles d’accès (Tableau 20).

Tableau 20 : Performances de MOVA appliqué à la régulation d’un rond-point

	Réduction des retards		Augmentation de la capacité	
	Echangeur global	Voies d’accès avec feux	Echangeur global	Voies d’accès avec feux
Heure de pointe matin	24%	27%	14%	23%
Heure de pointe après-midi	15%	18%	8%	16%

1.5 Perspectives de développement

MOVA a pour objectif futur la régulation de carrefours traversés par des véhicules à vitesse élevée i.e. au dessus de 40 mile/h soit 65 km/h. Les véhicules se présentant à l’entrée de ce type de carrefour pendant le feu orange ont, selon leur distance par rapport à la ligne de feux, le choix de :

- réduire leur vitesse et donc d’attendre pendant le feu rouge,

- augmenter leur vitesse avant le passage du feu au rouge.

Les véhicules situés à une distance critique et roulant à une vitesse critique se voient alors allouer une durée de vert supplémentaire. Un tel objectif nécessite l'installation de capteurs mesurant la vitesse des véhicules.

1.6 Bibliographie

- Vincent (R.A.), Young (C.P.). - Self-Optimising Traffic Signal Control Using Microprocessors, The TRRL MOVA strategy for Isolated Intersections. *Traffic engineering and Control*, July/August 1986, pp 385-387.
- Kemp (S.), Silcock (P.), D. Robertson (D.). - A Comparison of SCOOT and MOVA on the A12 Arterial Road. *Traffic Engineering and Control*, December 1997, pp 650-654.
- Le système MOVA améliore le trafic au niveau des échangeurs d'autoroute, *VEILLE Transports Intelligents*, N. 4, 2^e trimestre 1999, pp 9.
- Japs (B.). – The MOVA system of Traffic Control at Signalled Junctions: Experience in Edinburgh. *Traffic engineering and Control*, June 1999 ; pp 314-316.
- Crabtree (M.R.), Vincent (R.A.). – Bus Priority in MOVA. *Road Transport and Control*, 21-23 April 1998, Conference Publication N° 454, pp 85-89.
- Davidsson (F.), Kronborg (P.). – MOVA and LHOVRA : Traffic Signal Control for Isolated Intersections, *Traffic engineering and Control*, April 1993 ; pp 195-200.

2 MOTION

2.1 Le système

L'objectif de MOTION - *Method for the Optimization of Traffic signals In On-line controlled Networks* - est d'élaborer un système de régulation de trafic adaptatif, applicable à un réseau de carrefours, sur les principes des techniques de régulation:

- par onde verte, au niveau d'un réseau de carrefours,
- de micro-régulation, appliquée au niveau des carrefours isolés.

Ce système s'appuie sur la notion classique de plans de feux. Il présente la particularité d'avoir une structure modulaire, hiérarchisée. On distingue :

- *le niveau stratégique*, pour tout le réseau de carrefours. Les durées de cycle et décalages y sont déterminées à une fréquence variant de 10 à 15 minutes. C'est à ce niveau que la décision d'accorder la priorité aux véhicules de type transport en commun est prise.
- *le niveau tactique*, pour chacun des carrefours. Les caractéristiques du cycle courant y sont modifiées une fois par cycle.

- *le niveau opérationnel*, pour chacun des carrefours. C'est ici que la politique de micro régulation est mise en oeuvre.

2.2 Les capteurs

MOTION s'appuie sur deux types de capteur fournissant :

- des données stratégiques, collectées en entrée et sortie du réseau, et à des points critiques situés entre 100 et 200 mètres, en amont de la ligne de feux,
- des données locales. Les capteurs chargés de la détection de véhicules particuliers (par opposition aux véhicules de type transport en commun) sont situés à 40 mètres en amont de la ligne de feux pour la mesure de débits entrants, entre 20 et 40 mètres en aval du carrefour pour la mesure des débits sortants.

Quelque soit leur position, les capteurs fournissent:

- le nombre de véhicules par unité de temps,
- les taux d'occupation,
- les intervalles entre le passage de deux véhicules successifs.

Les données sont ensuite pré-traitées pour le calcul:

- de la demande,
- des profils de débit cyclique,
- des degrés de saturation,
- des temps de parcours,
- des retards,
- des nombres d'arrêts.

2.3 Stratégie de régulation

2.3.1 Stratégie de régulation pour les véhicules particuliers

On distingue les politiques de régulation mises en œuvre, pour les véhicules particuliers, aux niveaux suivants: stratégique (niveau *réseau*), *local* (niveau *d'un carrefour*), *tactique* et *opérationnel*.

2.3.1.1 Au niveau stratégique

Les opérations réalisées au niveau stratégique sont les suivantes :

Dans un premier temps, les données mesurées au niveau stratégique sont transférées vers les niveaux locaux en vue de l'estimation du flux de véhicules particuliers à chaque carrefour. Chaque carrefour calcule alors les durées de vert pour toutes les phases et la durée minimale du cycle.

Dans un second temps, en fonction des informations calculées au niveau de chaque carrefour, une durée de cycle commune à tous les carrefours du réseau est déterminée et imposée à chaque carrefour. Sur cette base, chaque carrefour recalcule la durée de vert. Puis, les matrices origines/destinations sont calculées à partir des données fournies par les capteurs, en vue d'une coordination globale des plans de feux.

Enfin, les décalages sont déterminés. Deux cas sont à envisager selon que la durée de cycle et la séquence d'enchaînement des feux ont été ou non modifiées par rapport aux 15 minutes précédentes. S'il n'y a pas eu de modification, les décalages sont calculés en fonction des valeurs précédentes. S'il y a eu des modifications, deux décalages possibles sont calculés, l'un minimisant les retards, l'autre assurant une coordination des plans de feux en début du vert. Tous deux ont bien évidemment une influence sur la qualité de l'onde verte. Cette influence est traduite sous forme d'un indicateur de performance, KAPPA, exprimé en terme de nombre d'arrêts et de retards observés lors de la traversée du réseau. Au niveau de chaque carrefour, le meilleur décalage, au sens du critère KAPPA, est sélectionné. Au niveau du réseau, le décalage ayant le KAPPA le plus élevé est sélectionné. Afin de ne pas détruire l'onde verte construite, des contraintes au fonctionnement de chaque carrefour sont imposées.

2.3.1.2 Au niveau local

A ce niveau, seules les décisions opérationnelles et tactiques sont appliquées.

2.3.1.3 Au niveau tactique

Ce niveau traite de la détection des incidents. Si un incident est détecté, le contrôleur modifie les caractéristiques des plans de feux selon des stratégies prédéterminées ou met en œuvre un escamotage de phases.

2.3.1.4 Au niveau opérationnel

C'est la durée de vert qui est modifiée selon des contraintes fournies par le niveau stratégique.

2.3.2 Priorité aux bus

Plusieurs types de priorité peuvent être accordées aux véhicules de transport en commun. On distingue la priorité *absolue* de la priorité *relative*. Si la priorité absolue est accordée, les véhicules subissent le moins de retard possible lors de la traversée des carrefours situés sur leurs itinéraires, et ce indépendamment du trafic. Par contre, si la priorité accordée aux véhicules de transport en commun est conditionnée par le retard subi par les autres véhicules, il s'agit alors de la priorité relative. Ces priorités sont plus ou moins prises en compte dans les contraintes imposées par le niveau stratégique.

2.4 Bibliographie

- Bielefeldt (C.), Busch (F.). – MOTION: A New One-Line Traffic Signal Network Control System. *Road Traffic Monitoring and Control*, 26-28 April 1994, Conference Publication N°391, IEE, 1994, pp 55-59.
- Bielefeldt (C.), Busch (F.). – MOTION - A New One-Line Model for Urban Traffic Signal Control. *7th IFAC/IFORS Symposium on Transportation Systems: Theory and Applications of Advanced Technology*, Tianjin, China, August 24-26, 1994, pp 603-607.
- Busch (F.), Friedrich (B.), Kruse (G.). – MOTION: Une Nouvelle Méthode de Commande de la Signalisation Lumineuse Urbaine.

Richter (M.), Bielefeldt (C.), Booth (T.), Busch (F.), Friedrich (B.), Kruse (G.), Ploss (G.). - Improvement in Traffic Signal Control by New On-Line Model MOTION. *Proceedings of the First World Congress on Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle-Highway Systems*, 30 Nov- 3 Dec 1994, Paris, Vol. 2, pp 540-547.

Wieck (M.). – MOTION : A New Solution for Real-time Adaptive Control. Third World Congress on Intelligent Transportation Systems, Orlando, Florida, 1996, pp 262-263.

3 CARS

3.1 Le système

Apparu en 1991, CARS - *Control Autoadaptativo para Redes Semaforizadas* - est un système de régulation des réseaux urbains, des axes et des carrefours isolés. Il a été développé par l'Université Polytechnique de Catalogne en Espagne. Différents éléments de CARS sont issus d'autres systèmes de régulation: l'horizon glissant d'OPAC, l'approche de SCOOT pour la régulation basée sur de petites variations.

3.2 Les capteurs

Chaque tronçon peut avoir un nombre quelconque de capteurs et utiliser, en particulier les boucles déjà existantes sur les carrefours et utilisées pour la micro-régulation. Néanmoins le nombre et leur position affectent les performances du système. Quelques règles ont donc été mises au point pour assurer l'efficacité du système.

3.3 Modèle d'écoulement

Le modèle d'écoulement remplit deux fonctions : l'une est de mettre à jour l'état du réseau, l'autre de tester les stratégies de commande des feux proposées par la partie régulation. La base de ce modèle est d'écouler des paquets de véhicules contenant un nombre variable de véhicules. Un algorithme de suivi des paquets, de regroupement ou de partitionnement assure la dynamique. Les files d'attente sont horizontales pour permettre de modéliser correctement les situations de congestion et évaluer les espaces libres. Le temps est discrétisé par pas de δ secondes. $N\delta$ pas de temps forment un cycle de commande. Le modèle a un fonctionnement par cycle qui s'effectue en deux temps.

1. Le module de remise à jour de l'état permet, en début de cycle de commande, de corriger l'estimation de l'état précédent du réseau. A partir de l'état du réseau en début du cycle et des mesures de trafic, il fournit l'état du réseau en fin de cycle. Pour chaque δ du cycle, les variables du modèle sont comparées aux mesures réelles du terrain. Les paquets sont alors corrigés, partitionnés ou détruits, de nouveaux paquets sont générés.
2. A partir de cet état corrigé, l'état du système en fin de cycle courant est prédit sur la base des prédictions des arrivées sur les tronçons et des espaces libres en sortie de

carrefour. Le modèle prédictif recalcule des coefficients de prédiction lorsque les différences entre valeurs mesurées et valeurs prédites augmentent.

3.4 Méthode de régulation

L'approche utilisée s'apparente à celle de SCOOT. De petites variations sur les phases sont étudiées pour minimiser un critère. L'originalité réside en trois points:

- L'horizon de temps est calculé à chaque fois comme étant le cycle du carrefour.
- La première phase est ajustée.
- Pas de considération de décalages et de cycles communs entre carrefours.

La méthode de régulation cherche l'état des feux pour chaque carrefour du réseau. Le critère est évalué sur un sous-réseau autour du carrefour durant l'horizon de temps. Pour les tests, ce sous-réseau se restreint aux entrées sur le carrefour à réguler. La taille du sous-réseau dépend des conditions de trafic. L'horizon est glissant par pas de la valeur du cycle de commande.

3.5 Évaluation du système

Des tests en simulation avec le modèle d'écoulement microscopique AIMSUN ont été effectués en 1991, puis en 1993 avec une seconde version du système. Ces tests ont porté sur des carrefours isolés, des axes et des réseaux sous des conditions de trafic fluide et dense. Le pas de temps a été fixé à 2 secondes, le cycle de commande de 5 pas de temps soit 10 secondes.

Les tests ont montré des améliorations de 5 à 30% sur le temps total d'attente par rapport à des cycles fixes optimisés pour des situations de trafic similaires. Les résultats sont proches de 30% dans le cas d'un trafic fluide pour un réseau. Dans le cas d'un trafic dense, les meilleurs résultats sont obtenus pour un carrefour isolé (12%) et surtout dans le cas d'un axe (22%).

L'algorithme peut traiter jusqu'à 15 intersections en temps réel sur une station SUN SPARC 10.

3.6 Bibliographie

- Grau (R.), Barcelo (J.). - The Cars Demand Responsive Traffic Control System: Recent Improvements and Experiences. *IEE Road Traffic Monitoring and Control*, IEE Conference Publication 391, April 1994, pp 391.
- Barcelo (J.) et al. - *CARS: A Demand Responsive Traffic Control System*. Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering, Proceedings of the Second International Conference, 1991.
- Barcelo (J.) et al. - CARS: An Experience in Demand-Responsive Traffic Control. *Proceedings of the First Meeting of the EURO Working Group on Urban Traffic and Transportation*, Landshut, Germany, October 1992.

4 CRONOS

4.1 Le système

Conçu en 1990, CRONOS - *ContROl of Networks by Optimization of Switchovers* - est un système de régulation temps réel par commande des feux. Il s'applique aussi bien à la gestion des carrefours simples ou complexes – présentant de nombreuses lignes de feux – qu'à des réseaux de plusieurs carrefours. Il a été développé au Département Analyse et Régulation du Trafic à l'INRETS. Sa boucle de commande se déroule de la même façon que pour OPAC et PRODYN. Il présente l'originalité de pouvoir être utilisé sous deux modes distincts : le mode centralisé où le réseau est régulé dans une même optimisation en une seule fois et le mode décentralisé où chaque carrefour est optimisé séparément.

Une autre originalité par rapport aux systèmes présentés dans cette synthèse est de non seulement ne pas utiliser le concept de cycle de feux (comme PRODYN, OPAC) mais aussi de ne pas définir de phases de trafic a priori. Le carrefour se définit uniquement par des contraintes sur les groupes de feux appelées « contraintes de sécurité ». Elles définissent l'ensemble des états de feux qu'on interdit de voir sur le carrefour pour des raisons de sécurité.

4.2 Les capteurs

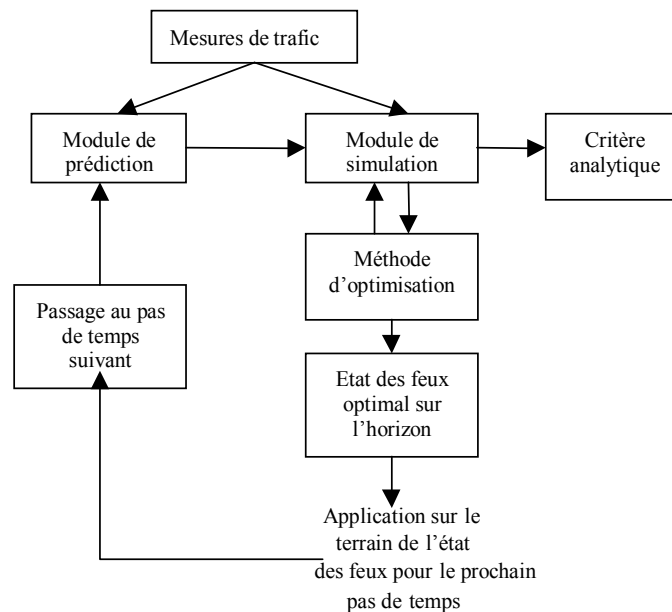
La connaissance des conditions du trafic en temps réel est apportée par des capteurs placés dans le voisinage du carrefour. Ces capteurs sont principalement des caméras vidéo dont les images sont traitées automatiquement pour fournir les mesures de trafic chaque seconde. Les caméras fournissent à la fois des mesures sur les tronçons et à l'intérieur des carrefours ; l'espace interne du carrefour n'est donc plus considéré comme ponctuel. Les boucles de comptage (boucles magnétiques) présentes sur le réseau peuvent être utilisées en complément.

4.3 La boucle de commande

La boucle de commande est illustrée sur la Figure 17. Le temps est discrétisé par pas de 1 à quelques secondes. Les mesures de trafic sont fournies à deux modules : un module de prédiction et un module de simulation. Le premier permet de prédire le profil des arrivées futures sur les entrées du réseau, le second sert de base au calcul du critère pour chaque configuration de feux testée. Une méthode d'optimisation permet de rechercher la configuration des feux qui minimise le critère donné sur un horizon de temps de l'ordre de la minute.

Après minimisation, le système fournit l'ensemble des états des feux pour toute la durée de l'horizon. Les états pour le prochain pas de temps sont effectivement appliqués sur le terrain puis l'horizon se décale d'un pas de temps et une nouvelle optimisation commence un pas de temps plus tard.

Figure 17 : Boucle de commande dans CRONOS



Module de prédiction

Sur la base des mesures élaborées dans le passé, ce module prédit les prochaines arrivées de véhicules sur les entrées du réseau sur l'horizon d'optimisation. En mode centralisé, les arrivées sur les tronçons internes au réseau sont calculées sur la base des départs des tronçons amont. En mode décentralisé, ces arrivées sont fournies par la simulation lors de l'optimisation précédente et pour la configuration optimale des feux choisie.

Module de simulation

Ce module propage les véhicules dans le réseau pendant tout l'horizon à partir d'un état des feux donné. Il modélise à la fois l'écoulement le long des tronçons et dans l'intérieur des carrefours pour traiter les zones de stockage comme celles des tourne-à-gauche.

4.4 Méthode de régulation

A partir de l'état des feux présent sur le terrain, la méthode d'optimisation a pour but de chercher la séquence des états de tous les feux sur l'ensemble de l'horizon qui minimise un critère donné. La méthode d'optimisation est basée sur une version modifiée de l'algorithme de Box. A partir de quelques solutions possibles, cette

méthode fonctionne par essais successifs où la solution fournissant le critère le plus grand est modifiée jusqu'à convergence.

Cette méthode a l'avantage d'être rapide et son temps de calcul n'augmente que de manière polynomiale si on augmente le nombre de tronçons et le nombre de carrefours à réguler dans la même optimisation. Cette particularité permet d'optimiser des réseaux de plusieurs carrefours en mode centralisé ou encore des carrefours complexes (nombreuses lignes de feux).

Le critère optimisé est le temps total d'attente au carrefour (et dans le carrefour) de l'ensemble des véhicules sur l'horizon de temps.

4.5 Évaluation du système

Un certain nombre de tests en simulation sur des données fictives ont été réalisés entre 90 et 93 pour comprendre et améliorer le fonctionnement de l'algorithme sous différentes conditions de trafic et différents réseaux.

Des tests en simulation sur données réelles ont été également menés en 94 pour la régulation du carrefour devant l'INRETS sous plusieurs périodes de trafic allant du dense au très fluide.

Les performances obtenues sur le temps total d'attente (entre 35 et 50%) par rapport aux feux du terrain présents au moment du test ont permis d'envisager un test en vraie grandeur sur ce carrefour.

Le dispositif expérimental installé sur le carrefour situé devant l'INRETS-Arcueil permet de recueillir des mesures de trafic précises basées sur des capteurs vidéo (file d'attente, indicateur de débits, taux spatial d'arrêt) et de commander à la seconde les feux du carrefour en appliquant différentes stratégies de régulation.

Cette expérimentation en vraie grandeur a permis d'établir une première série de résultats concernant l'évaluation de la commande temps réel CRONOS, par rapport à la stratégie utilisée par les exploitants du Val-de-Marne pour ce carrefour (plan de feux avec micro-régulation). Les gains en fluidité sont importants : un véhicule gagne en moyenne 20 % sur son temps d'attente et 11 % sur son nombre d'arrêts au carrefour. Ces performances restent stables quelle que soit la situation de trafic (heure de pointe à trafic très fluide). La comparaison en émission de CO₂ et en consommation de carburant (estimées par modélisation) révèle là encore des gains intéressants ; par exemple, pour la catégorie des véhicules à essence équipés de pot catalytique, on observe un gain de l'ordre de 4 % pour le coût brut de traversée de la zone du carrefour (400 mètres) et de l'ordre de 14 % sur la part due à l'arrêt dans ce coût.

4.6 Bibliographie

Boillot (F.), Blossville (J.M.), Lesort (J.B.), Motyka (V.), Papageorgiou (M.), Sellam (S.). - Optimal Signal Control of Urban Traffic Networks. *Sixth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, IEE London, April 1992, n° 355, pp 75-79

Boillot (F.), Pierrelée (J.C.), Lenoir (F.), Sellam (S.) - Operational urban traffic control system. 8th IFAC Symposium, Chania, Crète, June 1997, 623-627.

Midenet (S.), Boillot (F.), Pierrelée (J.C.) - Evaluation des enjeux énergétiques et environnementaux liés à la gestion des incidents dans les carrefours à feux isolés, Rapport Final de Convention ADEME n° 4 03 0038, Mars 1999.

Boillot (F.), Midenet (S.), Pierrelée (J.C.) - Real-life CRONOS evaluation, Tenth International Conference on Road Traffic Information and Control, IEE London, April 2000, n° 472, 182-186

Boillot (F.) - Group-based safety constraints description of an intersection. 9th Meeting of the EURO Working Group Transportation, Bari, June 2002

Conclusion

Devant les multiples nuisances engendrées par la circulation en constante augmentation, les objectifs de la régulation du trafic en milieu urbain, depuis quelques années, ne sont plus seulement des aspects de fluidité.

En France, les aspects diminution du trafic automobile, développement des transports en commun, amélioration des moyens de déplacements économes et les moins polluants (piétons, vélos, ...), les aspects cadre de vie et surtout la sécurité deviennent des directives législatives nationales. Celles-ci sont ensuite relayées par les villes dans la mise en place, par exemple en France, de Plans de Déplacements Urbains.

Ces directives se concrétisent généralement par des actions touchant surtout l'infrastructure avec la mise en place de zones 30 et de zones piétonnes, la construction de couloirs bus et de couloirs vélos, etc.

Ainsi, les nouvelles générations de systèmes de régulation temps réel devront (ils le font déjà dans une certaine mesure) intégrer ces nouvelles politiques et répondre aux nouvelles priorités.

Mais, d'un point de vue purement automobile, ils garderont aussi un rôle important à jouer : la place et la priorité laissées à l'automobile étant en décroissance, une optimisation la plus adaptée et performante sera nécessaire pour faire au mieux, tout en répondant aux nouvelles infrastructures et aux nouvelles orientations.

ANNEXE 1

TRANSYT

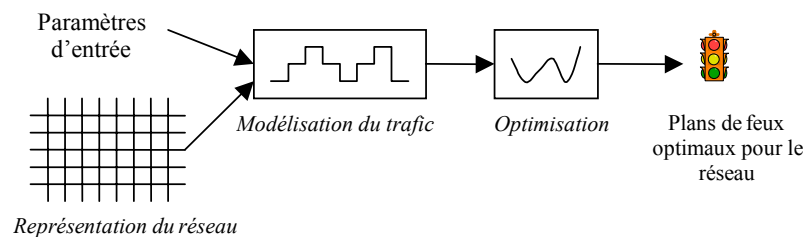
1 Introduction

TRANSYT - *Traffic Network Study Tool* - est un programme d'optimisation de la commande des feux en "temps fixe". Pour un réseau comprenant un certain nombre de tronçons et de carrefours et pour une période caractéristique pendant laquelle les débits entrants dans le réseau sont considérés constants, le programme détermine les plans de feux - répartitions optimales de durées de vert entre les différentes branches de tous les carrefours et décalages optimums entre ces mêmes carrefours - conduisant à un fonctionnement optimal du réseau. Tous les feux du réseau fonctionnent sur la même durée de cycle.

La première version de TRANSYT date de 1967 et a été développée par le TRRL - Transport and Road Research Laboratory - en Grande Bretagne. Depuis, les plans de feux calculés par TRANSYT sont à la base de nombreux systèmes de régulation de trafic implantés dans de nombreuses villes britanniques et à travers le monde. TRANSYT est également devenu un système de référence pour l'évaluation de l'efficacité des systèmes de régulation temps réel. Il continue à être amélioré; sa dernière version (version 10 new release) date de 1996.

La Figure 18 présente les différents modules constituant TRANSYT et présentés plus en détail par la suite.

Figure 18 : Architecture de TRANSYT



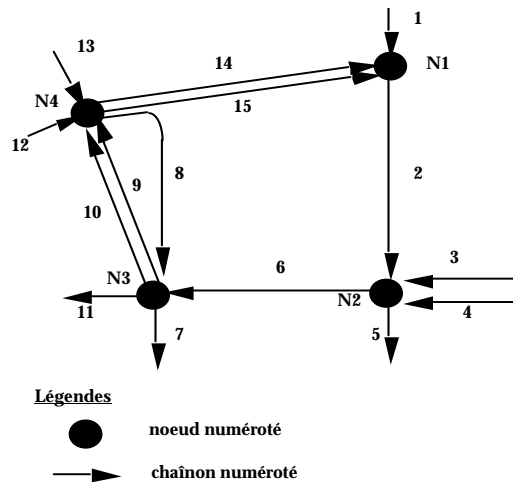
A partir de la représentation du réseau et des données d'entrée et caractérisant l'écoulement du trafic sur le réseau, le modèle d'écoulement du trafic calcule un indice de performance global du réseau. Le module d'optimisation cherche les plans de feux minimisant cet indice.

2 Modélisation du trafic

2.1 Représentation du réseau

Le réseau est représenté par un ensemble de nœuds reliés par des chaînons orientés (Cf. Figure 19). Un nœud est un carrefour à feux. Un chaînon est un courant de trafic unidirectionnel entre deux nœuds. Plusieurs chaînons peuvent figurer entre les nœuds pour représenter si nécessaire des courants de trafic séparés.

Figure 19 : Exemple de modélisation d'un réseau



2.2 Le modèle d'écoulement

La modélisation du trafic, utilisée dans TRANSYT, repose sur une approche macroscopique. Elle s'appuie sur un modèle hors ligne ; les données utilisées au cours de la simulation résultent d'une phase de recueil préliminaire.

Tous les feux du réseau fonctionnent sur une durée de cycle constante ou égale à sa moitié. La durée de cycle est divisée en un certain nombre d'intervalles réguliers ; en général, on considère 50 intervalles représentant donc chacun $(1/50)^{\text{ième}}$ de la durée totale. Toutes les variables utilisées sont des valeurs moyennées sur ce pas de temps.

2.2.1 Progression des pelotons de véhicules

A partir des données trafic hors ligne, des histogrammes de flux de véhicules sont reconstitués sur chaque tronçon au niveau de la ligne de feux. Ces derniers permettent de suivre la progression du trafic dans tout le réseau. Ils sont estimés, par propagation le long du tronçon, de l'histogramme de flux des véhicules entrant en début de chaînon. Une fonction dite de dispersion permet cette propagation, tout en prenant en compte des phénomènes de déformation des pelotons, résultant des vitesses non homogènes des véhicules formant le peloton.

La fonction de dispersion utilisée dans TRANSYT s'écrit comme suit

$$F = \frac{1}{1 + 0.35t}$$

dans laquelle $t = 0.8 * \text{temps de parcours moyen du tronçon}$, exprimé en nombre de pas de temps.

La relation permettant de calculer l'histogramme de flux au niveau de la ligne de feux en fonction de l'histogramme entrant s'écrit

$$q_{k+t}^1 = F \cdot q_k + (1-F)q_{k+t-1}^1$$

dans laquelle q_k^1 désigne le débit, au pas de temps k , de l'histogramme au niveau de la ligne de feux et q_k représente le débit, au pas de temps k , de l'histogramme entrant.

TRANSYT suppose que les débits entrants sur le réseau sont constants pendant toute la durée de la simulation. Les débits entrants sur les tronçons adjacents sont déterminés en fonction des pourcentages de mouvements tournants, supposés également constants pendant toute la durée de la simulation.

2.2.2 Calcul de la longueur des files d'attente

La longueur de la file d'attente verticale, à l'intervalle i , est définie comme étant le nombre de véhicules m_i présent au niveau de la ligne de feux pendant l'intervalle i . Notons m_i ce nombre de véhicules. Il est estimé comme suit à chaque pas de temps

$$m_i = m_{i-1} + q_i - s_i$$

avec q_i le nombre de véhicules arrivant au niveau de la ligne de feux à l'instant i , s_i le nombre de véhicules quittant le chaînon à l'instant i .

Le nombre de véhicules quittant le chaînon à l'instant i est estimé par la formule suivante : $m_{i-1} + q_i - m_i$

2.2.3 Autres informations calculées

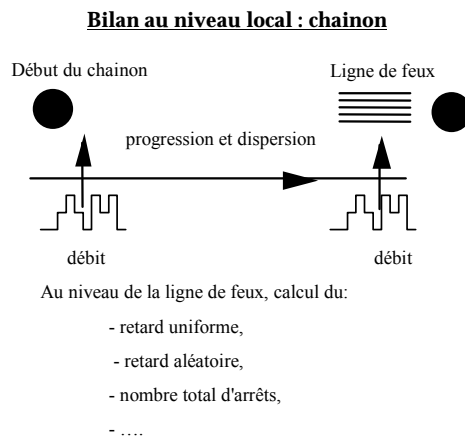
Pour chaque chaînon du réseau, les variables suivantes sont calculées (Cf. Figure 20):

- *Débit sortant.*
- *Débit de saturation.*
- *Taux de saturation.* Il représente, pendant le temps de vert effectivement utilisé, le pourcentage de la charge du chaînon par rapport à sa capacité maximum. Une valeur proche de 100 indique un fort risque de saturation.
- *Distance parcourue.* Produit du débit total par la longueur du chaînon; elle représente la demande de trafic sur le chaînon.
- *Temps passé.* C'est le nombre moyen de véhicules présents sur le chaînon, estimé comme la somme du nombre moyen de véhicules retardés et du nombre moyen de véhicules se déplaçant librement le long du chaînon. Le nombre moyen de

véhicules se déplaçant librement est obtenu en multipliant le débit total par le temps de parcours du chaînon, et est supposé indépendant du réglage des feux.

- *Retard uniforme* : nombre moyen de véhicules formant une file d'attente sur le chaînon. On suppose ici qu'il n'y a pas de fluctuation aléatoire du trafic d'un cycle à l'autre.
- *Retard aléatoire*. Il s'agit d'une correction appliquée pour tenir compte du retard supplémentaire occasionné par les fluctuations aléatoires de débit. Cette correction est fonction du degré de saturation.
- *Retard total moyen du chaînon*. C'est la somme du retard aléatoire et du retard uniforme.
- *Arrêts* : nombre moyen de véhicules par seconde qui s'arrêtent au feu.
- *Longueur maximale de la file d'attente* : valeur moyenne de la longueur maximale qui est prévue au cours du cycle.

Figure 20 : Informations liées au fonctionnement du chaînon



3 Détermination des plans de feux

3.1 Critère optimisé

Le critère minimisé est en fait un bilan global des performances du réseau - en terme de retards totaux uniforme et aléatoire, de nombre total des arrêts - obtenu à partir des bilans locaux effectués sur les différents chaînons du réseau. L'indice de performance global du réseau, noté IP, est calculé comme suit :

$$IP = \sum_{i=1}^{\text{nb de chaînons}} (R_i * \alpha_i + k * A_i * \beta_i)$$

dans laquelle R_i est la somme des retards uniforme et aléatoire sur le chaînon i , α_i est un coefficient pondérant l'influence du retard lié au chaînon i sur le réseau, k un

coefficient qui pondère la somme des arrêts par rapport à la somme des retards, A_i est le nombre d'arrêts sur le chaînon i , β_i est un coefficient pondérant l'influence du nombre des arrêts sur le chaînon i sur le réseau.

3.2 Optimisation

3.2.1 Détermination des plans de feux

On cherche à déterminer les répartitions, durées de vert et décalages entre les différentes phases de tous les carrefours, qui minimisent l'indice de performance du réseau. La démarche idéale consisterait à tracer la fonction *indice de performance* dans l'espace des paramètres du système, à en déduire le minimum par une méthode de descente. Vue la complexité du problème, il est bien évident qu'une telle démarche n'est pas envisageable. La méthode d'optimisation appliquée est par conséquent la suivante. Dans un premier temps, on cherche à déterminer les décalages, puis, les répartitions des durées de vert. Considérons un nœud du réseau, noté N. La procédure d'estimation du décalage optimal au nœud N consiste à :

1. Supposer comme constantes les caractéristiques relatives aux plans de feux de tous les autres nœuds du réseau,
2. Rechercher le décalage optimal au nœud N par une méthode de descente.

Tous les nœuds du réseau sont ensuite successivement traités. Une fois tous les décalages déterminés, la même séquence est appliquée pour les durées de vert.

3.2.2 Optimisation par une méthode de descente

La procédure d'estimation des décalages et durée de vert optimale s'appuie sur une liste d'incrément. Le premier incrément de cette liste est considéré et la valeur du décalage au nœud N est modifiée de la valeur du pas. L'indice de performance du réseau est alors calculé et comparé à celui qui a été obtenu avec les valeurs précédentes des décalages et des durées de vert. Deux cas sont à envisager :

- l'indice a diminué, on modifie alors le décalage de la valeur égale au pas d'incrément.
- l'indice a augmenté, on modifie le décalage de la valeur opposée au pas d'incrément.

Tous les nœuds du réseau sont ensuite successivement traités. La procédure est ré-appliquée avec le second incrément de la liste. Elle s'achève lorsque tous les pas d'incrément ont été considérés.

Les incréments sont choisis de manière à obtenir un compromis raisonnable entre la recherche d'un optimum conduisant à des performances satisfaisantes du réseau et les temps de calcul. La séquence recommandée pour un cycle de 50 tranches est: 7, 20, 7, 20, 1, 1. Il a été montré que l'incrément de 7 pas de temps permet de trouver de manière approximative un optimum local tandis que l'incrément de 20 évite de rester bloquer dans un minimum local. L'incrément de 1 pas de temps affine les résultats.

4 Données à fournir au système

Les données d'entrée sont de différente nature. Elles concernent, par exemple:

- *la définition du réseau* à l'aide de nœuds, de chaînons.
- *la durée de cycle*, les valeurs initiales des durées de vert et décalages.
- *les caractéristiques de l'écoulement du trafic* à l'intérieur du réseau telles que les pourcentages des mouvements tournants, les temps de parcours, les temps perdus, les vitesses moyennes, capacité de stockage.
- *les contraintes de sécurité sur les feux tricolores*.

Tous ces paramètres à fournir font de TRANSYT un système lourd. De plus, une connaissance du comportement du trafic dans le réseau est nécessaire.

5 Évaluation

Deux campagnes de test ont été menées pour évaluer les performances de TRANSYT. Des plans de feux élaborés manuellement servent de référence à la comparaison.

La première campagne de tests date de janvier 1966. Elle a eu lieu sur Cromwell Road et repose sur 8 carrefours. L'évaluation a duré quatre semaines et a été limitée aux périodes de pointe du matin et du soir pendant les jours ouvrables. Une réduction de 14,7% du temps de parcours a été observée.

La seconde campagne de tests a eu lieu à Glasgow. Le système de régulation de référence gérait un réseau comprenant 45 feux. Parmi les axes du réseau, 35 axes supportant un trafic modéré étaient régulés par micro régulation. Les 45 autres axes étaient régulés manuellement de manière à favoriser la propagation d'ondes vertes. La génération des plans de feux par TRANSYT a permis d'obtenir:

- Un meilleur fonctionnement du réseau quelque soit la période de la journée.
- Une réduction de 16% du temps de parcours ,
- Une augmentation de 25% de la capacité du réseau.

6 Mode d'exploitation

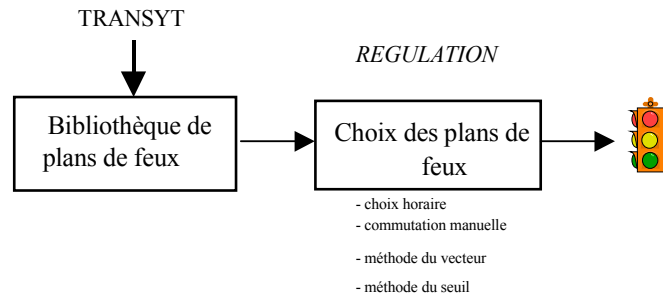
6.1 Outil de calcul des plans de feux

TRANSYT reste "l'outil" permettant le calcul de plans de feux à partir de données hors ligne. Ces plans de feux servent ensuite à la régulation du trafic dans les systèmes de régulation dits « à temps fixe »(Cf. Figure 21). Dans de tels systèmes, les plans de feux créés par TRANSYT sont soit stockés intégralement ou partiellement dans des bibliothèques et sélectionnés par l'une des techniques suivantes:

- *Commutation manuelle*. Un opérateur présent au P.C. de régulation impose son choix.
- *Programmation horaire*.

Sélection en temps réel par analyse de l'état du trafic à partir de données réelles fournies par des capteurs. Elle peut être effectuée par la "méthode du vecteur", fondée sur un calcul global de distance entre la situation de trafic observée et des situations de référence pour lesquelles des plans de feux ont été préalablement préparés. Le choix final se porte sur le plan qui minimise cette distance. La "méthode des seuils" est une alternative. Elle utilise un algorithme de tests en cascade, par comparaison de la valeur de certains paramètres décrivant le trafic à des seuils fixés,.

Figure 21 : TRANSYT dans un systèmes de régulation de trafic



6.2 Outil de référence

TRANSYT est un outil de calcul de plans de feux particulièrement appliqué en Grande Bretagne et aux USA. Le fonctionnement d'un réseau contrôlé par des plans de feux calculés par TRANSYT sert souvent de référence pour l'évaluation des performances d'autres systèmes de régulation ; un système de régulation est jugé performant si, au moins, il fournit des performances égales à celles de TRANSYT.

7 Récapitulatif des caractéristiques

Pays	Grande Bretagne: TRRL
Zone sous contrôle	Réseau décrit par un ensemble de chaînons et de nœuds
Type de modélisation de trafic	Macroscopique
Origine des données de trafic	Hors ligne
Définition du critère de performance	Global: somme des retards et nombre d'arrêts sur tous les chaînons du réseau
Technique d'adaptation au trafic	Changement de plans possible grâce à la méthode de programmation horaire, de la commutation manuelle, les méthodes du vecteur, des seuils
Paramètres optimisés	Durées de vert, décalages
Durée de cycle	Constante ou de moitié
Prédictions	Aucune
Technique d'optimisation	Méthode d'optimisation de Hill-Climbing: technique incrémentale et itérative.
Fréquence d'optimisation	Aucune
Architecture de régulation	Partiellement décentralisée: les réglages de chaque carrefour à feux sont déterminés, indépendamment les uns des autres, selon un critère de performance global.

8 Récapitulatif des variables de trafic utilisé par Transyt

Capteurs utilisés	Aucun capteur n'est utilisé directement car TRANSYT est un modèle hors ligne.
Variables de trafic estimées d'après des analyses statistiques	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Débit</u> <i>définition:</i> estimation des arrivées sur le tronçon • <u>Débit de saturation</u> <i>définition:</i> débit maximal de déchargement d'une file d'attente de véhicules. <i>rôle:</i> Charge/décharge de files d'attente • <u>Taux de saturation</u> <i>définition:</i> indice du temps de vert utilisé et de la charge du chaînon par rapport à sa capacité maximale. Une valeur proche de 100 indique un fort risque de saturation.
Variables du trafic reconstruites	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Distance parcourue</u> <i>définition:</i> produit du débit total par la longueur du chaînon; il représente la demande de trafic sur le réseau. • <u>Temps passé</u> <i>définition:</i> nombre moyen de véhicules présents sur le chaînon; somme du nombre moyen de véhicules retardés et du nombre moyen de véhicules se déplaçant librement le long du chaînon. Le nombre moyen de véhicules se déplaçant librement est obtenu en multipliant le débit total par le temps de parcours du chaînon, et est supposé indépendant du réglage des feux. • <u>Retard uniforme</u> <i>définition:</i> nombre moyen de véhicules formant une file d'attente sur le chaînon en supposant qu'il n'y ait pas de fluctuation aléatoire de trafic d'un cycle à l'autre. • <u>Retard aléatoire</u> <i>définition:</i> correction appliquée pour tenir compte du retard supplémentaire occasionné par les fluctuations aléatoires de débit. C'est une fonction du degré de saturation • <u>Retard total moyen du chaînon</u> <i>définition:</i> somme du retard aléatoire et du retard uniforme • <u>Arrêts</u> <i>définition:</i> nombre moyen de véhicules par seconde contraints de s'arrêter au feu. • <u>Longueur de file d'attente maximale uniforme</u> <i>définition:</i> valeur moyenne de la file d'attente maximale qui est prévue au cours du cycle par le calcul.

Critère optimisé	Somme à chaque cycle sur tous les chaînons des retards uniforme et aléatoire, pondérés par des coefficients selon l'influence des chaînons sur le réseau, des arrêts pondérés par des coefficients selon l'influence des chaînons sur le réseau.
------------------	--

9 Bibliographie

Robertson (D.). – TRANSYT: Method for Area Traffic Control. *Traffic Engineering and Control*, October 1969, pp 276 - 283.

TRANSYT- Manuel d'utilisation, CETUR, Décembre 1978.

Robertson (D.). The TRANSYT Method of Co-Ordinating Traffic Signal. *Traffic Engineering and Control*, February 1997, pp 76 - 77.

Vincent (R.A.), Mitchell (A.I), Robertson (D.I.). – User Guide to TRANSYT Version 8, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Laboratory Report 888, 1980.
