



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Université de Nancy 1

UFR Ecole Supérieure des Sciences et
Technologies de l'Ingénieur de
Nancy

DFD Automatique et Production
automatisée

Ecole Doctorale IAE + M



CNRS URA 821

THESE

Présentée par

Jean-Marc THIRIET
Ingénieur ESSTIN

en vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I

Spécialité Automatique

CONTRIBUTION A LA DETECTION ET A L'ANALYSE D'ANOMALIES DE TRAFIC EN MILIEU URBAIN REGARDS SUR L'EXISTANT EN REGULATION DU TRAFIC URBAIN

soutenue publiquement le 5 février 1993 devant la commission d'examen

Président : C. HUMBERT
Professeur à l'Université de Nancy I
Rapporteurs : J. LATERRASSE
Directeur de recherche au CNRS, à l'ENPC
G. METZGER
Professeur à l'Université de Haute Alsace
Examinateurs : M. ROBERT
Maître de Conférences Habilité à l'Université de Nancy I
J.J. DAVAINE
Directeur de l'ILGU
P. HÄCKELMANN
Docteur-Ingénieur au Stadtplanungsamt de Sarrebruck

Annick

Mes Parents

Remerciements

Le travail présenté ici a été effectué au Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN) en collaboration avec la Ville de Nancy dans le cadre de l'I.L.G.U. (Institut Lorrain du Génie Urbain). Qu'il me soit permis ici de remercier profondément toutes les personnalités qui ont bien voulu m'aider ou me supporter durant cette période :

Je tiens à remercier profondément Monsieur le Professeur Claude HUMBERT d'avoir bien voulu m'accueillir dans son laboratoire et de me faire l'honneur de présider le jury.

Que Monsieur Michel ROBERT, docteur habilité, reçoive ma profonde gratitude pour les conseils qu'il m'a généreusement prodigués et pour l'amitié qu'il me témoigne.

Je remercie de tout cœur Monsieur Jean LATERRASSE, Directeur de Recherche au C.N.R.S., et Monsieur le Professeur Gérard METZGER, d'avoir bien voulu juger mon travail.

Que Monsieur Jean-Jacques DAVAINE, directeur de l'I.L.G.U., reçoive toute ma reconnaissance pour m'avoir fait confiance en me chargeant de ce travail.

Ich möchte mich auch besonders bei Herrn Dr.-Ing. Häckelmann aus dem Stadtplanungsamt Saarbrücken bedanken, der mir einerseits sehr viele Informationen zur Verkehrsleitung und -Steuerung zur Verfügung stellte und andererseits sich bereiterklärte in der Jury zur Beurteilung meiner Dissertation mitzuarbeiten.

Je voudrais remercier toutes les personnalités émanant d'organismes divers, qui ont pu m'aider dans ma recherche :

R.D. BRETHERTON du "Transport and Road Research Laboratory" (Royaume-Uni).

S. CARE-COLIN du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Est.

J.L. CONRAD de la Ville de Nancy.

J.L. FARGES du CERT-DERA.

F. HEITZ de la Communauté Urbaine de Strasbourg.

J.C. LARRIVEE du Ministère des Transports du Québec.

J.B. LESORT de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

M. PEETERS du Ministère Wallon de l'Equipement et des Transports (Belgique).

J. RAGOT du Centre de Recherche en Automatique de Nancy.

M. RAMBICUR de la Ville de Nancy.

J.C. RISSEUR de la Ville de Nancy.

A. ROUSSEY de la Ville de Nancy.

L. RUPERT du "Federal Highway Administration" (Etats-Unis).

C. SOUSSAN du Centre d'Etudes des Transports Urbains.

Les différents organismes et villes contactés pour l'étude sur les systèmes de régulation du trafic urbain de par le monde sont personnellement remerciés dans le rapport correspondant à cette étude.

Je voudrais ici remercier chaleureusement les collègues du laboratoire pour leur soutien, et plus particulièrement les personnes suivantes qui m'ont aidé à un moment ou à un autre de mon étude :

G. BLOCH, E. GNAEDINGER, G. HASHIM ABDALSADA, J.P. JOUANNET, I. MAIRET, J.M. RIVIERE, S. ROTH, D. THEILLIOL ainsi que F. KÄSTNER pour les traductions allemandes, Annick, Marion et Claudy pour les relectures.

Je voudrais, pour terminer, exprimer mes vifs remerciements à tous mes enseignants à l'ESSTIN et ailleurs sans qui le présent document n'aurait jamais vu le jour.

Sommaire

<i>Introduction</i>	1
<i>Première partie - La régulation de trafic urbain, un état de l'art</i>	5
<i>Chapitre 1 - Régulation du trafic urbain</i>	7
1. <i>Introduction</i>	7
2. <i>Historique de la régulation du trafic urbain</i>	7
3. <i>Etat de l'art dans le monde</i>	8
3.1 <i>Stratégies de régulation</i>	8
3.2 <i>Principaux types de stratégies de macro-régulation</i>	11
3.3 <i>Principaux systèmes de régulation</i>	15
4. <i>Problématique de la régulation du trafic urbain</i>	15
4.1 <i>Evaluations des stratégies, suivis et tests d'efficacité des systèmes</i>	16
4.2 <i>Etat actuel</i>	18
4.3 <i>Pour le futur</i>	19
4.4 <i>Analogies gardien de la paix - système de régulation</i>	21
4.5 <i>Tableau comparatif de divers systèmes</i>	28
4.6 <i>Adaptativité au cas nancéien</i>	31
5. <i>Conclusion</i>	32
<i>Références bibliographiques de la première partie</i>	33
<i>Seconde partie - Détection, localisation et analyse d'anomalies de trafic et de défauts capteurs</i>	39
<i>Chapitre 2 - Anomalies en régulation du trafic urbain</i>	41
1. <i>Introduction</i>	41
2. <i>Saturation</i>	41
2.1 <i>Traitement de la saturation - considérations générales</i>	41
2.2 <i>Développement du réseau viaire</i>	43
2.3 <i>Diminution du nombre de véhicules qui empruntent le réseau</i>	44
2.4 <i>Prise en compte de la saturation dans les systèmes de régulation</i>	44
3. <i>Analyse des anomalies d'après les données provenant du système de détection du poste central de la circulation à Nancy</i>	46
3.1 <i>Anomalies chroniques</i>	47
3.2 <i>Anomalies accidentelles</i>	47
4. <i>Classification d'incidents</i>	47
4.1 <i>Anomalies de trafic</i>	47
4.2 <i>Défauts de capteurs</i>	49
4.3 <i>Autres altérations des signaux des boucles</i>	50
4.4 <i>Classification d'anomalies en fonction des signaux émis par les boucles magnétiques</i>	50
5. <i>Conclusion</i>	50

<i>Chapitre 3 - Capteurs</i>	51
1. <i>Introduction</i>	51
2. <i>Définitions de capteurs</i>	51
3. <i>Implantation des boucles magnétiques</i>	53
4. <i>Capteurs futurs en régulation du trafic urbain</i>	55
4.1 <i>Types de capteurs</i>	55
4.2 <i>Une boucle magnétique améliorée ?</i>	56
4.3 <i>Un carrefour intelligent</i>	56
5. <i>Conclusion</i>	57
<i>Chapitre 4 - Problématique</i>	59
1. <i>Introduction</i>	59
2. <i>Modélisation</i>	59
3. <i>Expériences antérieurement menées à Nancy</i>	64
3.1 <i>Etude statistique des courbes provenant du système de détection d'anomalies de Nancy</i>	64
3.2 <i>RESCU - modèle d'analyse de trafic</i>	68
4. <i>Analyse du carrefour 38</i>	70
4.1 <i>Topologie et renvois de vert</i>	70
4.2 <i>Détermination des sas de remplissage</i>	71
4.3 <i>Liens entre feux et boucles</i>	71
4.4 <i>Estimation des pourcentages directionnels</i>	72
5. <i>Variables utilisables à partir d'une boucle magnétique</i>	77
5.1 <i>Comptage</i>	78
5.2 <i>Taux d'occupation</i>	78
5.3 <i>Vitesse</i>	81
5.4 <i>Longueurs de files</i>	84
6. <i>Conclusion</i>	84
<i>Chapitre 5 - Détection par modèle</i>	85
1. <i>Introduction</i>	85
2. <i>Modèle de connaissance</i>	85
2.1 <i>Rappels sur les réseaux de files d'attente</i>	85
2.2 <i>Modélisation du trafic sur le carrefour</i>	86
3. <i>Modèles de représentation</i>	89
3.1 <i>Régression pas à pas</i>	90
3.2 <i>Modèle ARX</i>	91
3.3 <i>Modèles de la famille PEM</i>	93
3.4 <i>Modèle utilisant la théorie des réseaux neuronaux</i>	93
4. <i>Comparaison des modèles</i>	96
5. <i>Conclusion</i>	97
<i>Chapitre 6 - Détection par observation de paramètres</i>	99
1. <i>Introduction</i>	99
2. <i>Présentation de l'algorithme</i>	99
3. <i>Transitions</i>	102
4. <i>Phases et situations détectables</i>	103
5. <i>Utilisation de l'algorithme</i>	105
6. <i>Conclusion</i>	106

<i>Références bibliographiques de la seconde partie</i>	107
<i>Conclusion, perspectives et remarques sur l'intégration des modèles élaborés précédemment dans une stratégie de régulation</i>	113
<i>Annexe A - Les systèmes de Nancy, Paris, Bordeaux et PRODYN.....</i>	117
1. Introduction	117
2. Système de Nancy	117
3. Système de Paris	120
4. Système de Bordeaux	123
5. Système PRODYN	125
<i>Annexe B - Carte et programmes pour l'acquisition</i>	127
1. Introduction	127
2. Installation de la carte et du programme au poste central de la circulation pour l'étude approfondie des flux et autres variables sur le carrefour 38	127
3. Campagnes de mesure et validations	129
<i>Annexe C - Détection d'anomalies sur un axe.....</i>	131
1. Algorithme utilisé	132
2. Détection d'incidents	133
3. Extensions de l'algorithme	133
<i>Annexe D - Cahier des charges.....</i>	135
<i>Annexe E - Glossaire.....</i>	137

Introduction

Lorsqu'un système de régulation de trafic est implanté dans une ville ou une agglomération, il fonctionne bien en général tant que le trafic n'est pas dans un état de congestion (blocage total) ou de ralentissement. Comment et pourquoi atteint-on cet état de saturation et que faire pour l'éviter ? C'est cette question qui a été à l'origine de la convention entre le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CNRS URA n° 821) et la Ville de Nancy, dans le cadre de l'I.L.G.U. (Institut Lorrain du Génie Urbain).

Ce mémoire est le résultat d'une étude sur la régulation de trafic urbain, sur la caractérisation et l'analyse d'anomalies. Il s'insère dans une démarche "génie urbain"⁰.

Ce mémoire comprend six chapitres. Une première partie sur l'état de l'art de la régulation de trafic urbain contient le premier chapitre. Les autres chapitres sont regroupés dans une seconde partie sur la détection, l'analyse et la classification d'anomalies de trafic.

Le premier chapitre relate une recherche prospective des différents systèmes de régulation de trafic existant dans les grandes métropoles françaises et dans des villes étrangères. Nous comparons ces différents systèmes et leurs stratégies de régulation. Les résultats de ce travail ont fait l'objet d'un rapport annexe. Toutefois, ce chapitre rappelle l'essentiel en proposant la comparaison des principaux systèmes de régulation existant en France, des synoptiques des principaux types de stratégies et une tentative de redéfinition du système de régulation du trafic urbain. La modélisation est faite par utilisation de la méthode SADT¹ en confrontant le point de vue du gestionnaire de trafic qui observe sa ville globalement et celui du gardien de la paix qui ne voit que son carrefour et l'environnement proche mais qui détient beaucoup d'informations localement. Nous comparons les systèmes existants ou actuellement en cours de développement avec le cas du gardien de la paix réglant la circulation dans un carrefour et un système futur qui pourrait intégrer toutes les fonctionnalités que nous entrevoyons à l'heure actuelle dans les programmes de recherche mais qui n'ont pas encore toutes été regroupées.

Le second chapitre pose le problème de l'anomalie de trafic urbain. Il nous faut en effet définir ce que nous entendons par anomalie de trafic, état de saturation et état de fluidité du trafic. Nous allons voir comment les collectivités locales tiennent compte de ces états. Nous présentons ensuite une étude des anomalies de trafic détectées par le système mis en place au poste central de la circulation à Nancy. Une typologie des anomalies est enfin proposée.

Le troisième chapitre nous rappelle quels sont les différents capteurs utilisés en régulation de trafic urbain et le type d'informations que nous pouvons espérer en extraire. Ensuite, nous nous focalisons plus particulièrement sur la boucle magnétique puisque c'est le seul capteur

⁰C. Martinand - Le génie urbain : rapport de Martinand au ministre de l'Equipement, de l'Aménagement du territoire et des Transports - La documentation française, 1986.

¹Structured Analysis and Design Technics

installé sur le site nancéien. Une prospective des capteurs futurs pour la régulation du trafic est également proposée.

Le quatrième chapitre pose les premiers jalons de la modélisation. Une bibliographie succincte est proposée sur ce thème. Deux expérimentations qui ont eu lieu à Nancy sont ensuite décrivées : la première relate la mise en place d'un système de détection d'anomalies au poste central de la circulation qui fonctionne sur deux carrefours, la seconde expose l'analyse de trafic RESCU* effectuée dans le cadre d'un projet de Diplôme d'Etudes Approfondies en 1991. Les différents paramètres que nous pouvons extraire des informations émises par les boucles magnétiques sont finalement recensés.

Le cinquième chapitre décrit un modèle de connaissance du trafic sur le carrefour qui a servi de zone-test et compare ce modèle de connaissance à des modèles de représentation. Ce modèle servira de référence pour le fonctionnement normal du trafic par opposition aux états d'anomalies.

Dans le dernier chapitre, nous étudions très précisément l'évolution temporelle des signaux émis par les boucles et les corrélations entre ceux-ci. Un algorithme de supervision de boucles magnétiques est proposé pour la détection et l'analyse des anomalies de trafic et défauts de capteurs à partir de ces signaux.

Dans la conclusion, nous proposons des remarques sur l'intégration de notre algorithme dans une stratégie future, puisque l'intérêt serait de ne pas en rester simplement à la détection et à l'analyse mais de faire agir le résultat de ces informations sur la commande des feux tricolores.

Sur le plan méthodologique, notre démarche a consisté en une approche essentiellement analytique puisque nous effectuons une acquisition de valeurs numériques sur le carrefour 38 et une analyse de ces valeurs, en nous référant donc à l'état réel du carrefour.

Cette démarche a été adoptée pour éviter de trop théoriser le problème de l'anomalie de trafic et pour pouvoir utiliser des valeurs réelles ou现实的 de signaux générés par des capteurs ayant fait leurs preuves en pratique. C'est une démarche couramment utilisée en recherche appliquée et plus particulièrement pour les études de trafic [JB Lesort, Pourquoi mesurer le trafic ?, RTS n°28, 1990].

 : Dans ce document, les références bibliographiques sont regroupées à la fin de chacune des deux parties du mémoire. Celles-ci sont indiquées dans le corps du texte entre [crochets] ; les renvois à d'autres paragraphes du présent document sont symbolisés par des {accolades}. Un glossaire est disponible en annexe de même qu'un dessin du carrefour 38 qui a servi de zone test pour les expérimentations {annexe B}.

Dans tout le document, certains mots sont suivis d'un astérisque* qui renvoie au glossaire.

Première partie - La régulation de trafic urbain, un état de l'art

Chapitre 1 - Régulation du trafic urbain

1. Introduction

Le présent chapitre définit dans quel contexte se situe la régulation du trafic urbain. Pour commencer, nous allons faire un bref historique. Le paragraphe suivant propose les synoptiques des principaux types de stratégies. Le dernier paragraphe tente une redéfinition du système de régulation du trafic urbain en vue de mettre en évidence ses potentialités actuelles et futures ainsi que ses insuffisances. A l'aide de la méthode SADT², nous disséquons le cas d'un gardien de la paix effectuant la circulation au centre d'un carrefour, afin de comparer les fonctionnalités mises en œuvre à celles d'un système de régulation de trafic urbain. Cette comparaison entre le gardien de la paix et différents types de systèmes de régulation est proposée en fin de chapitre.

2. Historique de la régulation du trafic urbain

Depuis toujours, les villes densément peuplées ont été soumises à des embouteillages dus aux besoins de déplacements des populations. Au moyen-âge déjà [Braudel], les charrettes se déplaçant dans les ruelles entraînaient une saturation des voies de communication. L'apparition de l'automobile au début du siècle puis sa démocratisation n'ont fait qu'amplifier le phénomène. Pour essayer d'endiguer celui-ci, la voirie a été progressivement réorganisée pour séparer les zones réservées au déplacement de celles destinées au stationnement tant des véhicules que des piétons et étalages (marchés). Une autre raison d'amélioration des déplacements réside dans l'ouverture de grands axes permettant un écoulement plus fluide des flux circulatoires (cf. l'urbanisme du baron Haussmann à la fin du XIX^e siècle). L'étape suivante a été la mise en place de panneaux indicateurs destinés soit à orienter les usagers soit à leur donner des ordres (limitation de vitesse, sens interdit) ou des informations de danger. Ces panneaux indicateurs étaient (ou sont) fixés une fois pour toutes et immuables dans le temps. Sur les carrefours, les ordres de priorité étaient donnés par panneaux fixes (stops, balises) ou implicites (priorité à droite). L'inconvénient de cette immobilité est que ces informations données aux usagers ne peuvent pas tenir compte de l'évolution possible du système (heures de pointe, manifestations). Pour remédier à cela, la première alternative a consisté à dépêcher des gardiens de la paix pour assurer la circulation sur les carrefours critiques aux heures de pointe. Le gardien de la paix sert dans ce cas à la fois de capteur évolué et de moyen de commande entièrement adaptatif.

²Structured Analysis and Design Technics

Les premiers panneaux dynamiques apparus sur le réseau routier sont les feux tricolores qui changent automatiquement et périodiquement les priorités aux carrefours. Les prémisses de la régulation ont donc consisté en la mise en place de feux tricolores sur les carrefours, ce qui a contribué à améliorer la sécurité, notamment celle des piétons. Ces carrefours étaient ou sont commandés localement soit par un plan de feux³ fixes, soit par un système de vert sur la voie principale avec passage au vert de la transversale seulement lorsqu'un véhicule actionne un détecteur. Ces systèmes sont encore utilisés et largement suffisants dans des petites agglomérations ou sur des carrefours isolés. Des ondes vertes ont constitué une première phase d'amélioration par rapport aux feux commandés indépendamment les uns des autres.

Sur le plan de la coordination, des stratégies à plans de feux fixes ont été appliquées pendant longtemps et ce n'est qu'à partir du début des années 80 qu'apparaissent les méthodes temps réel (SCOOT*, PRODYN*) [Henry & al. 84].

3. Etat de l'art dans le monde

3.1 Stratégies de régulation

Les paramètres qui sont utilisés en régulation du trafic urbain sont au nombre de 3 : le **cycle**^{*}, les **phases**^{*} (temps de vert des différentes voies) et le **décalage**^{*} entre les verts de carrefours adjacents.

- Le cycle d'un carrefour est le temps que met le carrefour pour se retrouver dans sa configuration de départ, chaque feu ayant eu son temps de vert.

- Les phases sont les états (vert, rouge, orange, orange clignotant) dans lesquels se trouvent les feux ; chaque feu change plusieurs fois de phases durant un cycle.

- Le décalage exprime le temps que met un carrefour pour se mettre au vert sur la voie principale lorsque le carrefour amont s'est mis au vert sur la même voie ; c'est par ce paramètre qu'il est possible d'agir sur les coordinations d'axe et de donner aux véhicules une vitesse limite de déplacement.

L'adaptation dynamique aux conditions de la circulation s'effectue par le biais d'algorithmes "temps réel" de sélection (méthodes du **vecteur** ou des **seuils**), de modulation, de création des plans de feux ou de commutations d'états (stratégies temps réel). La plupart des systèmes traditionnels conservent cette notion de **plans de feux** ; seuls de nouveaux systèmes tels que PRODYN* ne l'utilisent plus.

³Programme de séquencement des feux tricolores

3.1.1 Stratégies temps réel

Il s'agit essentiellement des stratégies utilisées dans des systèmes tels que SCOOT^{*} ou PRODYN^{*} qui proposent des réglages de feux en fonction des paramètres mesurés en général par des capteurs plus nombreux que dans le cas de la multiprogrammation [Cohen 90] [Henry & al. 84] [Henry & al. 89]. Ces systèmes essaient de coller le plus possible à l'état réel du trafic. Le premier applique une modulation des plans de feux ; le second travaille sur la notion de commutations d'états.

Il est difficile de mettre en œuvre un système temps réel [Vichet 78] car :

- * Les données à recueillir, donc les transmissions, sont coûteuses.
- * Le temps de calcul des plans de feux est beaucoup trop long, à moins d'utiliser des modèles de trafic extrêmement simplifiés dénaturant totalement l'image de ce trafic sur un réseau important. SCOOT a essayé de s'affranchir de ce problème en ne créant pas de toute pièce des plans de feux à chaque itération mais en modulant à partir du plan de feux de l'itération précédente. Pour cela, la stratégie considère que le trafic évolue lentement et que le choix du plan de feux de l'itération précédente n'était pas forcément trop mauvais.

Il est intéressant de noter que le principe même d'une stratégie totalement adaptative ne semble pas satisfaisant car il consiste à essayer de faire correspondre au mieux plans de feux et situation réelle, or la régulation doit **gérer** et non **suivre** le trafic.

3.1.2 Multiprogrammation

Bibliographie : [Gabard 90]

La **multiprogrammation** permet d'adapter les feux aux situations caractéristiques du trafic, répétitives et prévisibles. Il s'agit de plans de feux fixes adaptés à des moments précis de la journée qui sont changés par une horloge, en captant l'heure distribuée sur la porteuse diffusée par France Inter ou par un autre moyen de décision ; c'est cette méthode qui est utilisée par le programme PIAF^{*} [Page 85]. En tout état de cause, il s'agit de plans de feux mémorisés dans une bibliothèque. Ce mode de fonctionnement est en général utilisé dans le cas des carrefours isolés, pendant la phase de mise au point du système ou lors de fonctionnements dégradés.

La **coordination** ou **macro-régulation** (action sur un ensemble ou un groupe de carrefours) regroupe les carrefours dans le cadre d'une stratégie globale de mise en place d'ondes vertes ou minimisation des retards-décalages ; il faut pour cela que les carrefours soient synchronisés sur le même cycle. Le but est de diminuer le temps de parcours et par conséquent d'augmenter le débit de véhicules sur le réseau par une diminution du nombre d'arrêts. La commande peut être manuelle ou pilotée par le trafic. La compatibilité entre micro et macro-

régulation est traitée dans un rapport de préétude [CETE & CETUR].

Dans ce cas, deux méthodes principales sont utilisées, en plus du traditionnel choix horaire : la **méthode des seuils** où les données du trafic sont comparées à certains seuils caractéristiques des différentes situations et la **méthode du vecteur** [SETRA 75 pp.11-13]. Pour cette dernière, un vecteur est construit dans un espace à autant de dimensions que de mesures en provenance des détecteurs. Après chaque période de mesure, ce vecteur est comparé aux modèles associés aux plans de feux préétablis. La distance minimale trouvée entre le vecteur mesure et un vecteur modèle conduit au choix du plan de feux auquel est associé le vecteur modèle le plus proche. Dans la méthode des seuils, qui reste très utilisée en Allemagne, se pose le problème de l'explosion combinatoire lorsqu'elle est utilisée avec beaucoup de capteurs. La méthode du vecteur est la plus utilisée en France. Le Royaume-Uni utilise la méthode classique du choix par horloge, à l'heure actuelle le plus souvent combinée à la stratégie temps réel SCOOT*.

La multiprogrammation comporte, comme le trafic, deux niveaux d'actions [Vichet 78] :

- * Des plans de feux précalculés et mis en mémoire, correspondant aux quelques situations fondamentales.
- * Des adaptations de ces plans de feux ayant pour objet d'affiner le plan en place pour répondre aux variations aléatoires du trafic ou favoriser certains véhicules.

3.1.3 Micro-régulation

La **micro-régulation** (action sur un seul carrefour) permet de s'adapter aux variations aléatoires et imprévisibles du trafic [Le Cocq 71 p.17] [Cohen 90]. Ce principe utilise des informations données par des capteurs et n'a de sens que si ceux-ci bénéficient d'une maintenance appropriée. Cette technique est mise en œuvre sur des carrefours isolés ou sur des carrefours s'intégrant dans une stratégie globale de régulation. Elle a des possibilités d'anticipation-prolongation de vert pour les autobus ou les véhicules prioritaires. Dans le cas des carrefours isolés, les boucles sont gérées et utilisées directement par le contrôleur de carrefour qui décide lui-même du partage du vert entre la principale et la transversale. Dans le cas de carrefours s'intégrant dans une stratégie globale de régulation, les informations en provenance des boucles ou autres capteurs sont envoyées au coordinateur central ou au coordinateur de zone. Celui-ci applique une politique globale ou permet une adaptativité gérée localement à certains moments et dans certaines limites.

Il existe trois algorithmes fondamentaux de méthodes adaptatives :

- **L'algorithme à intervalles-véhicules** se contente de donner le feu vert à la

transversale lors d'une demande de la part d'un véhicule, la principale étant au vert le reste du temps. L'inconvénient de cet algorithme est qu'il ne tient pas compte du fait qu'il peut y avoir beaucoup de véhicules en attente sur la principale au moment du vert transversal.

- **L'algorithme volume-densité** est une amélioration du précédent tenant compte de la longueur de la file d'attente et du temps d'attente de la phase au rouge.

- **L'algorithme de Miller** consiste à minimiser les temps d'attente sur l'ensemble du carrefour.

3.2 Principaux types de stratégies de macro-régulation

Nous avons donc élaboré une classification des types de stratégies en nous basant sur la classification proposée par J-B Lesort [Lesort 85]. Nous développons les cinq types de stratégies utilisées dans le monde. Nous explicitons pour chaque stratégie ce que le terme **temps réel** veut dire.

Premier type :

Principe : Plans de feux stockés dans une bibliothèque (créés hors ligne "off line") et choisis par une horloge ou sélectionnés en temps réel à l'aide des valeurs des capteurs (méthodes des seuils ou du vecteur). *C'est ici la "sélection" et non la "création" des plans de feux qui est "temps réel".* Les premiers systèmes relevant de cette technique furent implantés au milieu des années 60.

Implantation : C'est de loin le principe le plus répandu dans le monde.

Bibliographie : [Courbet & al. 84] [Mathieu & al. 87] [Mowatt & al. 84] [Rousseau & al. 87].

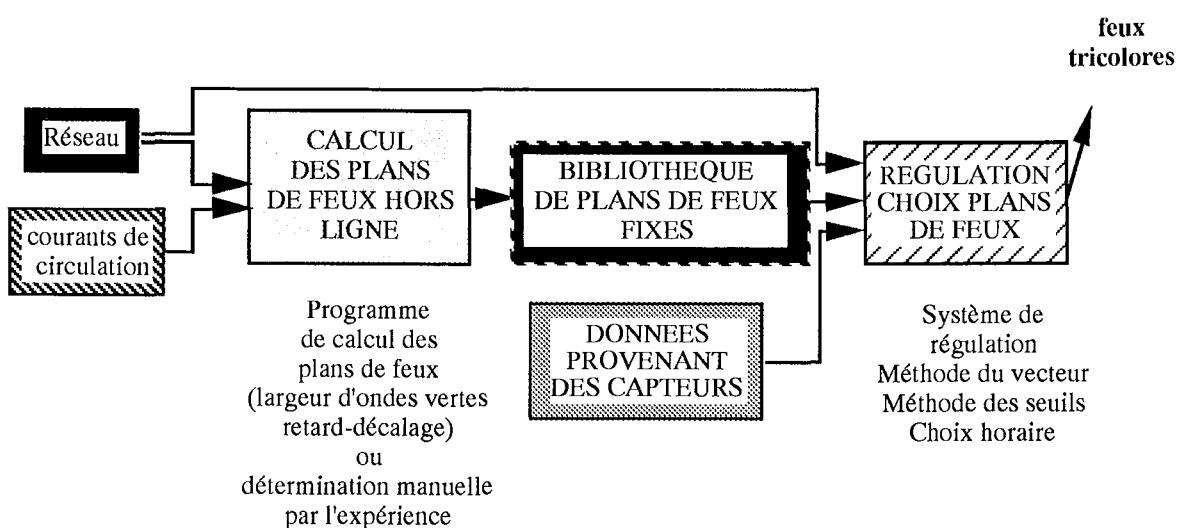


Figure 3.2.a : Stratégie de premier type

Type 1,5 :

Principe : Il s'agit du même principe que précédemment mais avec la possibilité de créer des plans de feux en ligne ("on line").

Implantation : Los Angeles et Espagne.

Bibliographie : [Gabard 90] [Rowe 90].

Second type :

Principe : Ces systèmes développés entre 1975 et 1980 utilisent l'adaptativité locale. Des systèmes de ce genre ont été testés aux Etats-Unis à Washington ou à la Nouvelle-Orléans (UTCS⁴ control : TANSTP Traffic, CYRANO) mais ils n'ont pas permis d'atteindre les résultats escomptés et ont été abandonnés depuis. Par contre, un système français existe et semble répondre aux objectifs (GERTRUDE⁵). Sa stratégie consiste à n'élaborer que des squelettes de plans de feux, valeurs minimales et maximales de vert, délimitant le domaine dans lequel va agir la micro-régulation locale. *Cette stratégie se veut temps réel puisqu'elle utilise la micro-régulation locale.*

Implantation : le système français est installé dans quelques villes de France et au Portugal. Les systèmes américains ne semblent plus utilisés.

Bibliographie : [Annales 90] [Franceries 78] [Lesort 85] [McGowan & al. 80].

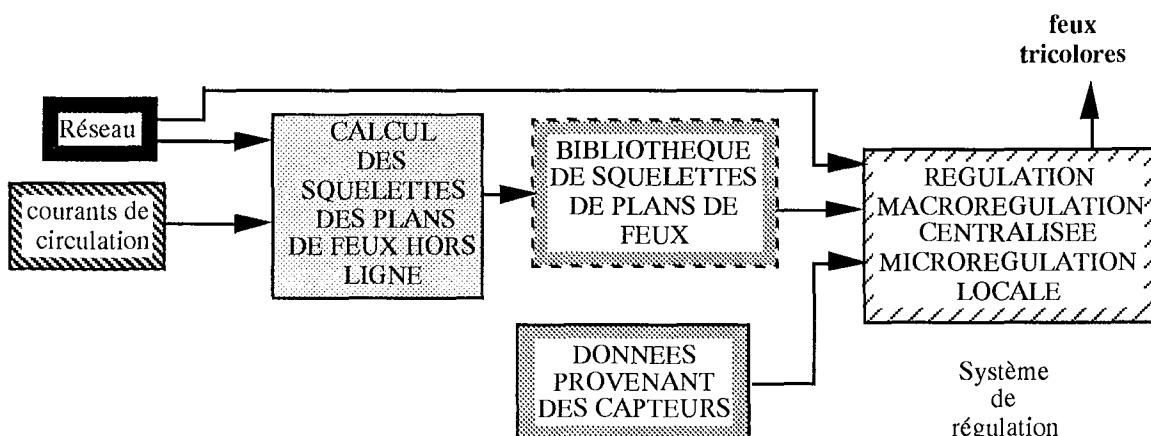


Figure 3.2.b : Stratégie de second type

Troisième type :

Principe : Cette stratégie date du début des années 1980. Elle comprend deux bibliothèques séparées de décalage et de temps de vert avec un **algorithme temps réel** de détermination du cycle du carrefour critique. Le plan de feux est par conséquent reconstitué en fonction de ces trois variables.

⁴Urban Traffic Control System

⁵Gestion Electronique de Régulation du Trafic Routier Défiant les Embouteillages

Implantation : Les grandes villes australiennes et néo-zélandaises.

Bibliographie : [Lowrie 82].

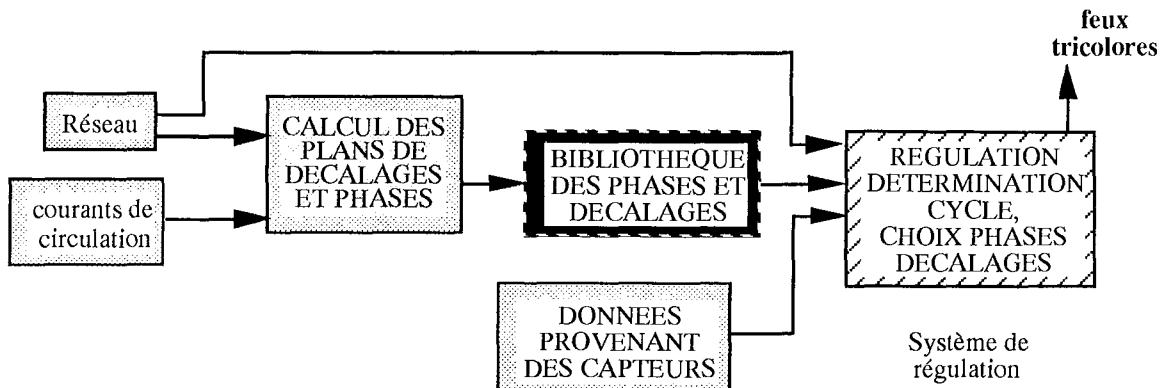


Figure 3.2.c : Stratégie de troisième type

Quatrième type :

Principe : Lancée également au début des années 1980, on peut considérer qu'elle est la **première vraie stratégie temps réel**. Cette stratégie procède par déformation progressive (ou modulation) de plans de feux (optimisation des trois paramètres : cycle, phase et décalage).

Implantation : Ce système équipe plusieurs villes de Grande-Bretagne, généralement en complément d'un système de premier type, et quelques villes hors Grande-Bretagne.

Bibliographie : [Hunt & al. 81].

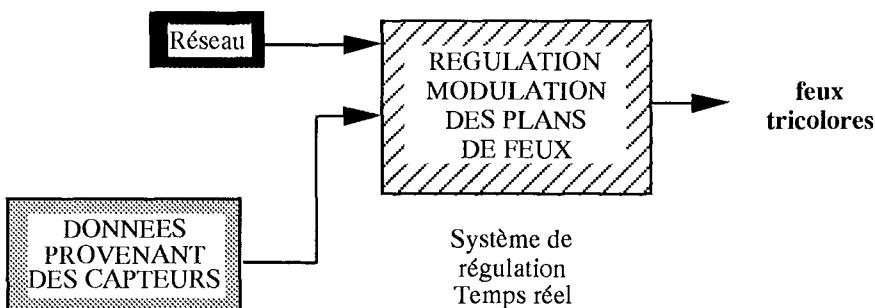


Figure 3.2.d : Stratégie de quatrième type

Cinquième type :

Principe : "Plans de feux" élaborés en temps réel. En fait, il n'est plus question ici de plans de feux puisque la stratégie consiste à se demander à chaque instant si l'état doit être changé ("commutation") et non pas à tenter d'optimiser séparément les trois paramètres. Cette stratégie opère sur un horizon fini et prédit les commutations futures sur cet horizon : à chaque itération, de nouvelles prévisions sont effectuées.

Implantation : Systèmes à l'état d'expérimentation ou en début de phase commerciale, à Toulouse, à Turin & aux Etats-Unis.

Bibliographie : [Donati & al. 84] [Gartner 89] [Henry & al. 89] [Farges 91].

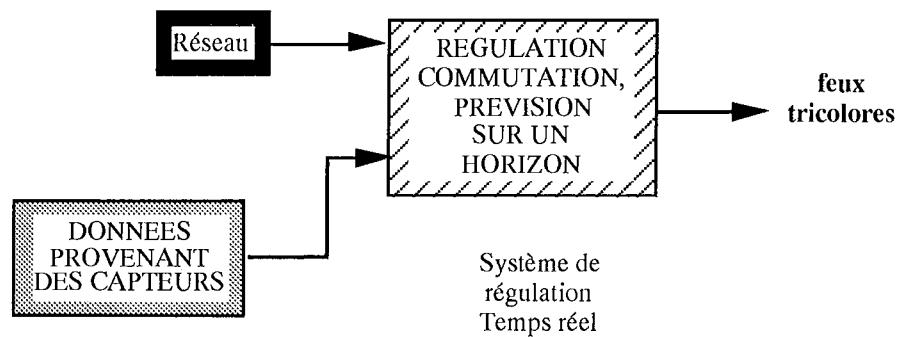


Figure 3.2.e : Stratégie de cinquième type

3.3 Principaux systèmes de régulation

Le tableau ci-après expose les principaux systèmes présents sur le marché en fonction du type de stratégie le plus couramment utilisé. La première colonne mentionne le nom des sociétés les commercialisant.

	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	Type 5
CALIFE (F) CGA (F) COMPUTRAN (USA) EAGLE (USA) EB TRAFIK (DK/SF) ECONOLITE (USA) ETRA (E) FERRANTI (GB) GEC (GB) GERTRUDE (F) GTME (F) ITALTEL (I) JHK (USA) MULTISONICS (USA) OPAC (USA) PLESSEY (GB) SCATS (AUS) SILEC (F) SIEMENS (D) SMART (I) SPERRY (USA) SPERRY (USA)	CALIFE CGA COMPUTRAN EAGLE ETCS2 ECONOLITE ETRA TRANSYT TRANSYT SIEMENS UTCS MULTISONICS TRANSYT SILEC SIEMENS UTCS AT SAC	CALIFE CGA (+ μ) ⁶ GERTRUDE SCATS		SCOOT SCOOT SCOOT	7 PRODYN OPAC UTOPIA

Tableau 3.3 : Principaux constructeurs mondiaux

En ce qui concerne les fournisseurs, il est intéressant de noter que SIEMENS (premier constructeur mondial) a racheté PLESSEY (premier britannique et second mondial) ce qui accentue encore l'impact du premier.

En France, le principal constructeur est CGA*.

4. Problématique de la régulation du trafic urbain

Les axes de recherche en régulation du trafic urbain sont concordants avec les axes de recherche dans les autres domaines des sciences de l'ingénieur, notamment le temps réel,

⁶Existence d'une micro-régulation sur certains carrefours.

⁷Intégration de PRODYN centralisé dans les systèmes centraux de CGA.

l'intelligence artificielle et le traitement d'images.

Actuellement, trois grands projets sont en cours de développement en France :

- * Un algorithme "temps réel" de régulation du trafic expérimenté sur la ZELT (Zone Expérimentale Laboratoire de Toulouse) : PRODYN*.
- * Un programme d'Intelligence Artificielle destiné à traiter la saturation et expérimenté à Paris : SAIGE*.
- * Le système de guidage ULIISSE à Lyon qui est dérivé de ALI-SCOUT*.

Au niveau international :

- * L'Italie expérimente le temps réel à Turin avec UTOPIA*, les Etats-Unis avec OPAC*.
- * L'Intelligence Artificielle est expérimentée aux Etats-Unis, en Australie et en Europe (CLAIRES, programme DRIVE [Bell & al. 91]).
- * Divers pays développent des systèmes de guidage : l'Allemagne (ALI-SCOUT/EUROSCOUT), le Royaume-Uni (AUTOGUIDE dérivé de ALI-SCOUT) et les Etats-Unis (ETAK/ TRAVELPILOT).
- * La ville d'Oakland (Michigan, USA) travaille sur un grand système intégré de régulation de trafic urbain et de guidage interactif dérivé de ALI-SCOUT [IVHS 91].

Des développements sont en cours en France, en Australie, au Japon et en Belgique afin de développer l'utilisation du traitement d'images.

Sur le plan algorithmique, la recherche s'oriente vers la saturation et la façon de la prendre en compte. L'utilisation d'un algorithme "stratégique" peut changer de type de régulation en fonction de l'état du trafic ; chaque état du trafic (fluide, saturé, ...) est déterminé à partir de la modélisation. Une autre école pense que la saturation ne peut se modéliser et oriente ses recherches vers l'intelligence artificielle. De tels travaux sont en cours de développement ou subissent actuellement les premières expérimentations [Bielli 91] [Papageorgiou 91] [Ritchie & al. 91] [Scemama 89]. Le but de l'utilisation des systèmes experts dans le domaine des transports est d'essayer de transposer le raisonnement humain afin de pouvoir résoudre essentiellement des problèmes non algorithmiques telle la saturation.

4.1 Evaluations des stratégies, suivis et tests d'efficacité des systèmes

Bibliographie : [Cohen & al. 86] [Hall & al. 80] [Houdemont 80]

Nous traiterons ici des comparaisons qui ont été faites entre divers systèmes de régulation expérimentés de manière concomitante dans une même ville, ce qui reste une expérience rarissime. Nous verrons, également, que certaines villes proposent des méthodes d'évaluation

de leurs propres systèmes, ceux-ci une fois installés.

Khoudour propose des méthodes, pour l'exploitation des mesures de trafic, permettant d'aller plus loin dans l'évaluation comparée des différentes stratégies. En effet, plusieurs stratégies ont été testées et comparées sur un carrefour de la ZELT* à Toulouse [Khoudour & al. 88]. Cette étude se base sur les méthodes de statistique dimensionnelle, analyse factorielle et classification automatique. Les trois méthodes testées sont la méthode de régulation par cycles fixes optimisés (méthode de Webster), la méthode de régulation adaptative par intervalle-véhicule et la méthode PRODYN*.

Cohen a testé quatre stratégies de régulation du trafic aux heures de pointe : THEBES* (plans de feux fixes optimisés), une onde verte, un algorithme adaptatif et une désynchronisation partielle des carrefours [Cohen 86].

La ville allemande de Darmstadt a mené une expérience semblable [Schlabbach 88].

Paris a expérimenté GERTRUDE* alternativement avec son système traditionnel pendant six semaines mais les résultats ne sont pas encore publiés.

Sur le plan des études statistiques intéressantes à faire pour suivre et analyser la circulation urbaine, il faut commencer par définir les variables qui nous intéressent [Cohen & al. 86] [Lesort & al. 82]. Une étude du CETE* de Normandie-Centre permet de voir quelles variables intéressent les villes de tailles différentes de cette région [CETE 88].

Houdemont a défini plusieurs indicateurs : un indicateur de qualité du déplacement, un indicateur de durée, un indicateur de régularité et un indicateur de gêne [Houdemont 80].

A Lille, un suivi informatisé de la circulation a été développé. Celui-ci s'avère très efficace [Dhondt & al. 86].

Belgrade propose une évaluation multicritère de son système de régulation de trafic [Batanovic 89].

La ville de Los Angeles propose également une évaluation de son système ATSAC* sur la "Coliseum Area" [Rowe & al. 87].

Le TRL* propose une méthode d'estimation des bénéfices possibles si l'on coordonne les signaux par TRANSYT* ou SCOOT* [Robertson & al. 82].

Lesort constate que les réseaux urbains ne sont pas équipés en moyens de mesures suffisants pour permettre une analyse fine du trafic [Lesort 89]. De plus, les critères classiques d'efficacité, comme le temps perdu ou les arrêts imposés, sont difficiles à mesurer automatiquement. Des sites expérimentaux ont ainsi été construits aux Etats-Unis pour le programme UTCS⁸, au Royaume-Uni pour TRANSYT et SCOOT et en France la ZELT⁹ pour PRODYN*.

⁸Urban Traffic Control System

⁹Zone Expérimentale Laboratoire de Toulouse

4.2 Etat actuel

En France, le "parc" se compose des constructeurs traditionnels CGA*, SIEMENS qui est présent dans le nord-est de la France, GERTRUDE* qui commence à s'implanter dans plusieurs villes. D'autres firmes sont présentes de manière plus ponctuelle (PRODYN*, SEMA-METRA (ex CERCI), SILEC).

Pour les petites villes ou les carrefours isolés, le système PIAF* se veut une norme. Ces villes plus petites sont équipées par les constructeurs CGA, GARBARINI, SEA, SFIM, SEMA-METRA, SEREL, SILEC, STERELA ; certaines des firmes précédentes travaillent avec la norme PIAF.

Au niveau international :

- * Le constructeur allemand SIEMENS équipe de nombreuses capitales en Europe centrale et dans le nord de l'Europe, l'Italie par l'intermédiaire d'ITALTEL ainsi que l'Amérique latine.
- * La Grande-Bretagne propose des systèmes basés sur TRANSYT* ou SCOOT* qui équipent certaines villes d'Asie du sud-est ou du Proche-Orient.
- * L'Australie propose son système SCATS* dans plusieurs de ses villes ainsi qu'en Nouvelle Zélande, Irlande et Chine populaire.
- * Les constructeurs américains équipent leur marché et le Canada.

En ce qui concerne les différences de politique nationales, il faut garder présent à l'esprit que les problèmes de circulation ne se posent pas toujours de la même manière :

- ⦿ En France, l'utilisation de la voiture est sacrée.
- ⦿ En Europe du Nord, l'impact des écologistes fait que privilégier les piétons, les deux roues ou les transports en commun n'est pas une hérésie.
- ⦿ Aux Etats-Unis, la configuration géographique des villes fait que les problèmes se posent plus en terme de voies rapides urbaines.
- ⦿ Dans les villes d'Asie du sud-est et de Chine, le véhicule-roi est la bicyclette ou le tricycle.

Une stratégie de régulation "vieillissant" très vite, il faut constamment analyser le trafic pour mettre à jour les paramètres utilisés par la stratégie de régulation. Il faut également avoir une vision globale de la stratégie à appliquer et garder présent à l'esprit que toute amélioration risque de se traduire par un nouvel "appel" de trafic par induction et ainsi donner une conséquence opposée à l'objectif envisagé [Franceries 78] [Parapanissios 82].

Des initiatives telles EUREKA-EUROPOLIS, PROMETHEUS (Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety : conception d'un véhicule capable de communiquer avec son environnement) ou DRIVE (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe, maintenant DRIVE II) ont pour but de coordonner les actions

europeennes dans ce domaine, surtout pour la normalisation [Cohen 88]. Dans le même but, les américains travaillent sur le projet PATH (Program on Advanced Technology for the Highway).

4.3 Pour le futur

Bibliographie : [May & al. 90] [TRB 88]

Les développements futurs de la régulation du trafic urbain devront naturellement de plus en plus s'intégrer dans une politique globale des déplacements. Le premier pas pourrait être l'interaction du système de guidage et du système de régulation (projet ULISSÉ).

L'intérêt serait, pour le système de régulation, de :

- Pouvoir utiliser les informations échangées entre les véhicules équipés et le système de guidage. Cela reviendrait à utiliser ces véhicules comme autant de capteurs flottants dans le trafic (connaissances exactes de leurs positions, vitesses, voire itinéraires). Lorsqu'une majorité de véhicules sera équipée, le système de régulation aura ainsi à sa disposition une image du trafic beaucoup plus détaillée qu'à l'heure actuelle.
- Connaître les itinéraires demandés par les usagers, donc savoir par où ils vont passer et à quel moment. Nous pourrions ainsi estimer avec une bonne fiabilité les risques d'apparition de saturations à différents endroits de la ville. Dans un dialogue perpétuel avec le système de guidage, ce dernier tentera d'optimiser les itinéraires tandis que le système de régulation anticipera la meilleure stratégie de régulation à utiliser. Sachant que les objectifs propres à chaque système peuvent être antagonistes dans certaines situations (véhicule prioritaire, prise en compte d'un incident, ...), il faudra par conséquent définir dans ce cas des priorités de fonctionnalité.

Un inconvénient majeur des systèmes de régulation actuels réside dans le fait que le déplacement des véhicules n'est pas optimal :

- 1) Par la non utilisation systématique du meilleur itinéraire, ce qui peut être résolu par le système de guidage.
- 2) Par la perte de temps au démarrage après le passage du feu au vert, associée au non respect de la vitesse optimale (non respect de l'onde verte : un véhicule, roulant vite et freinant au feu encore rouge, peut perdre ou gagner du temps individuellement mais en fait perdre collectivement par les ralentissements qu'il impose au peloton suivant). Il est possible d'imaginer que la commande automatique des véhicules pourrait être une étape qui permettrait d'amenuiser l'aspect stochastique de leur comportement et optimiserait donc leurs déplacements et le fonctionnement global du système [IVHS 92] [Schladover & al. 91]. Un système de commande automatique pourrait, dans certaines conditions, imbriquer le passage croisé de véhicules sur un carrefour en se contentant

de les ralentir, sans être obligé de stopper complètement un flot pour laisser passer l'autre. Les feux tricolores disparaîtraient ...

La finalité des systèmes de régulation de trafic pourrait se présenter sous forme de navettes individuelles appartenant à la collectivité (sorte de taxi automatique) qui intégreraient tous les avantages précédents en les combinant avec ceux des transports collectifs (pas de problème de stationnement, les véhicules restant sur le réseau) tout en restant individualisés. Les utilisateurs pourraient, à titre privé, conserver des véhicules équipés d'un système de propulsion et de guidage mixte :

- * Diesel ou autre (turbine à gaz, Diester, ...) hors des villes, piloté par l'homme et guidé par CD-ROM et des informations dynamiques comme dans PROMETHEUS*,
- * électrique, géré et piloté par le système de régulation/guidage en ville [Peugeot Magazine 91].

Un tel système pose quelques problèmes tel celui du financement, celui du respect des libertés individuelles (obligation d'utiliser le système), voire celui de l'avenir de l'industrie automobile...

Il faut toutefois garder présent à l'esprit que le développement d'un système intégré guidage / régulation et celui des systèmes annexes nécessiteront des échanges d'information sans comparaison avec ce qui se fait aujourd'hui. De plus, le développement de réseaux de communication urbains tel le projet RUCOMM (Réseau Urbain de Communication Multi-services) [Gnaedinger 91], pourra aider à résoudre ces problèmes.

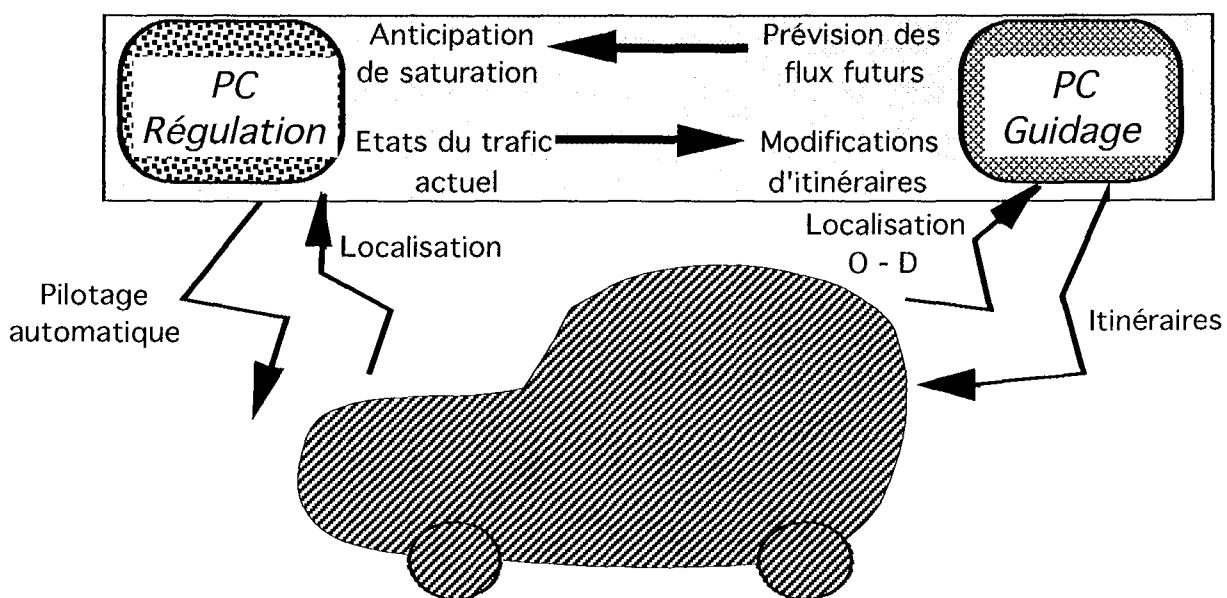


Figure 4.3 : Le système du futur

4.4 Analogies gardien de la paix - système de régulation

L'objectif est d'aboutir à une redéfinition du système de régulation en tenant compte des différences d'appréciation sur la circulation entre le gardien de la paix et le gérant d'un système de régulation :

- ❖ Le gardien de la paix, présent à un carrefour, a une vue très précise de ce qui s'y passe mais n'a, au mieux, qu'une vue des carrefours adjacents. Il peut avoir une certaine connaissance du quartier environnant ou même de toute la ville mais cette connaissance reste quasiment inemployée puisqu'il n'a aucune information sur ce qui s'y passe, pour peu qu'il ne soit pas relié à un poste central par un moyen de télécommunication.
- ❖ Le gérant du poste central de la circulation a une vision très globale de ce qui se passe dans sa ville à chaque instant mais il ne peut avoir une vision aussi précise du carrefour que le gardien de la paix par manque d'instrumentation et de capacité de communication.

Pour les comparer, nous proposons un tracé des diagrammes SADT du gardien de la paix qui régule la circulation.

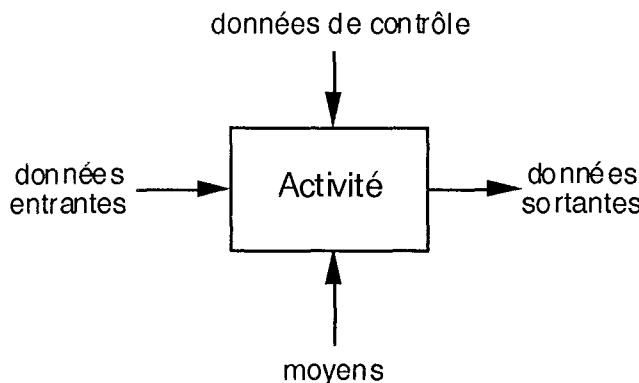
La comparaison a porté sur les domaines suivants:

- traitement des informations,
- micro-régulation locale classique,
- équilibrage de file,
- coordination d'axe,
- priorité à donner aux transports en commun,
- rétention de véhicules,
- incident soluble localement,
- incident non soluble localement.

4.4.1 Utilisation de la méthode SADT

Nous rappelons que la méthode SADT (Structured Analysis and Design Technics) est une aide à la conception ou à l'analyse des systèmes [SADT 89]. Celle-ci permet de décomposer un système existant ou à concevoir, en analysant progressivement chacune de ses fonctions. Pour expliciter une fonction dans le détail, il est possible d'entrer à l'intérieur de celle-ci grâce à une organisation en arborescence. C'est-à-dire qu'une fonction peut à son tour être décomposée en sous-fonctions et ainsi de suite.

Le symbolisme utilisé est le suivant :



L'activité agit sur des entrées selon un certain nombre de contraintes (les données de contrôle) et à l'aide des moyens (matériel) (figure ci-contre). Le résultat de l'activité se présente sous forme de données sortantes.

Figure 4.4.1.a : Actigramme SADT

Dans la figure ci-dessous sont représentées ce que sont les activités et données dans le cas qui nous préoccupe. L'activité consiste à gérer la totalité des flux entrants sur le carrefour. Les entrées sont par conséquent les flots de véhicules et piétons tandis que les sorties sont les véhicules et piétons qui sont passés "au mieux". Les moyens mis en œuvre sont les cinq sens du gardien de la paix, ses moyens d'action (bras, jambes) et son équipement (uniforme, bâton). Les données de contrôle sont une liaison radio avec son poste central et ses propres connaissances de la ville et des règles de circulation.

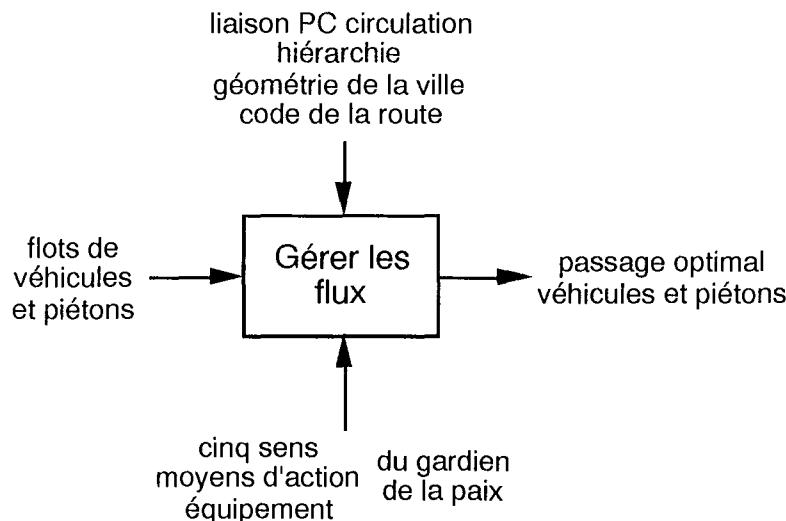


Figure 4.4.1.b : Actigramme SADT pour le gardien de la paix

4.4.2 Commentaires relatifs aux actigrammes SADT : analyse de ceux-ci et comparaison des fonctionnalités avec celles d'un système de régulation du trafic urbain

Nous allons présenter quatre actigrammes SADT tracés pour étudier le comportement du gardien de la paix. Chaque diagramme est suivi d'explications de ces fonctionnalités.

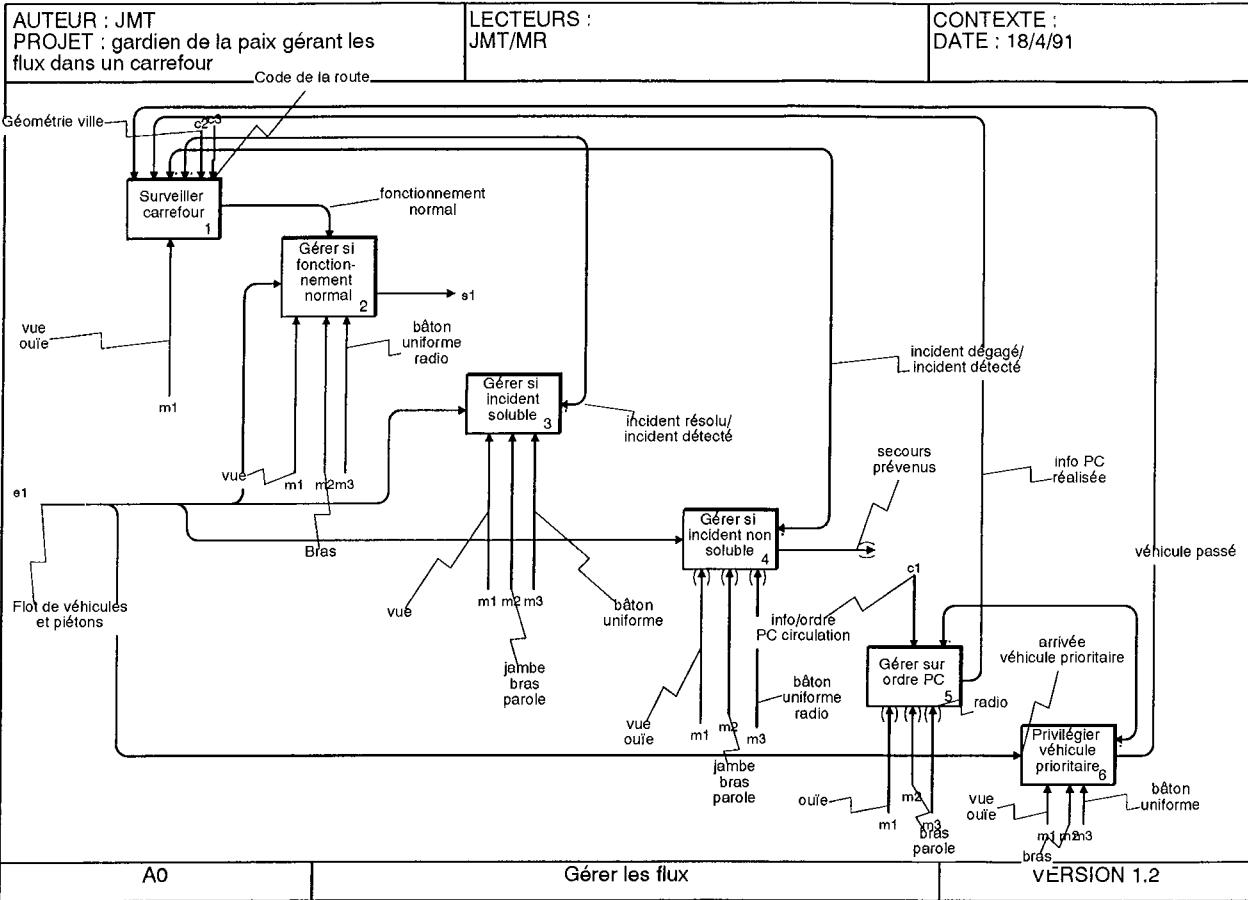


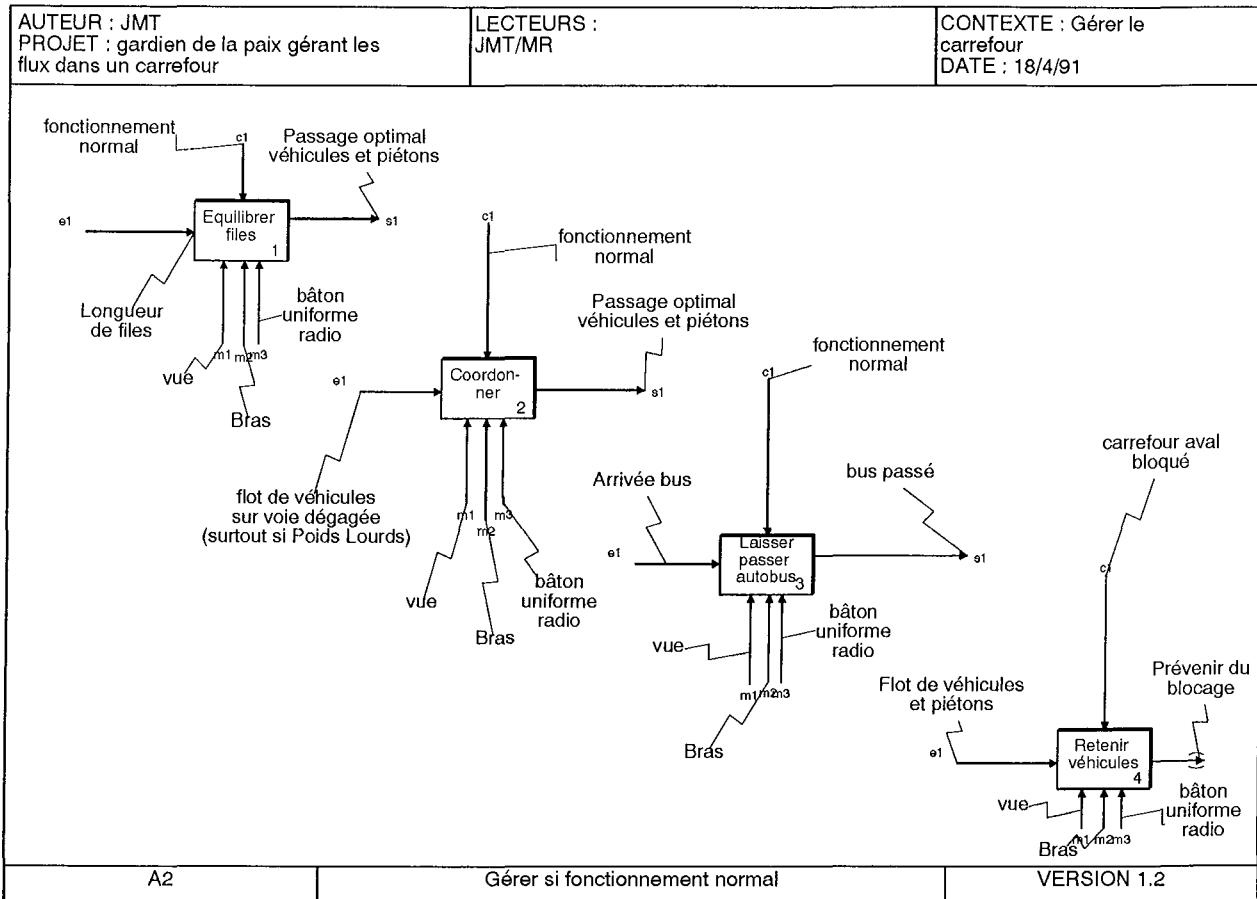
Diagramme A0 : Gérer le carrefour :

Le "fonctionnement normal" se définit par opposition aux états d'incidents.

L'incident soluble est par définition un incident que le policier a les moyens de résoudre sans intervention extérieure. L'incident grave est un incident qui nécessite une intervention extérieure (secours, CRS...).

Diagramme A1 : Traitement des informations : il est plus précis et plus local pour le gardien de la paix qui a une vue relativement objective et détaillée des choses (flux des véhicules entrants et sortants, traversées des piétons, anomalies ou incidents...). Le système de régulation se contente d'avoir une vue succincte des véhicules à l'aide de capteurs et une vue presque inexisteante des piétons. Par appui sur un poussoir de passage piéton, il peut être possible de savoir s'il y a des piétons sans en connaître le nombre. Un système de caméras peut donner des informations précieuses en ce qui concerne les piétons ou les incidents mais demande des moyens de traitement informatique qui interdisent pour l'instant l'exploitation commerciale complètement automatisée. Le système de régulation a toutefois une vue globale des flux de véhicules sur la ville ou le quartier, vision que le gardien de la paix n'a pas.

En terme de capteurs, le gardien de la paix possède ses yeux et oreilles qui lui donnent une vision macroscopique du trafic, l'ouïe lui servant à détecter des choses inhabituelles (arrivée d'un véhicule de secours, choc entre deux véhicules...). Le gardien de la paix peut effectuer une localisation de véhicules et par conséquent intégrer la régulation microscopique (aspect guidage). Le système de régulation a également une vue macroscopique du trafic, par les boucles magnétiques, les capteurs piézo-électriques, les capteurs pneumatiques ou les radars. Cependant, il pourra également avoir une vision microscopique, par l'utilisation d'un couplage avec le système de guidage, ce qui entraînera un échange d'informations assez conséquent.



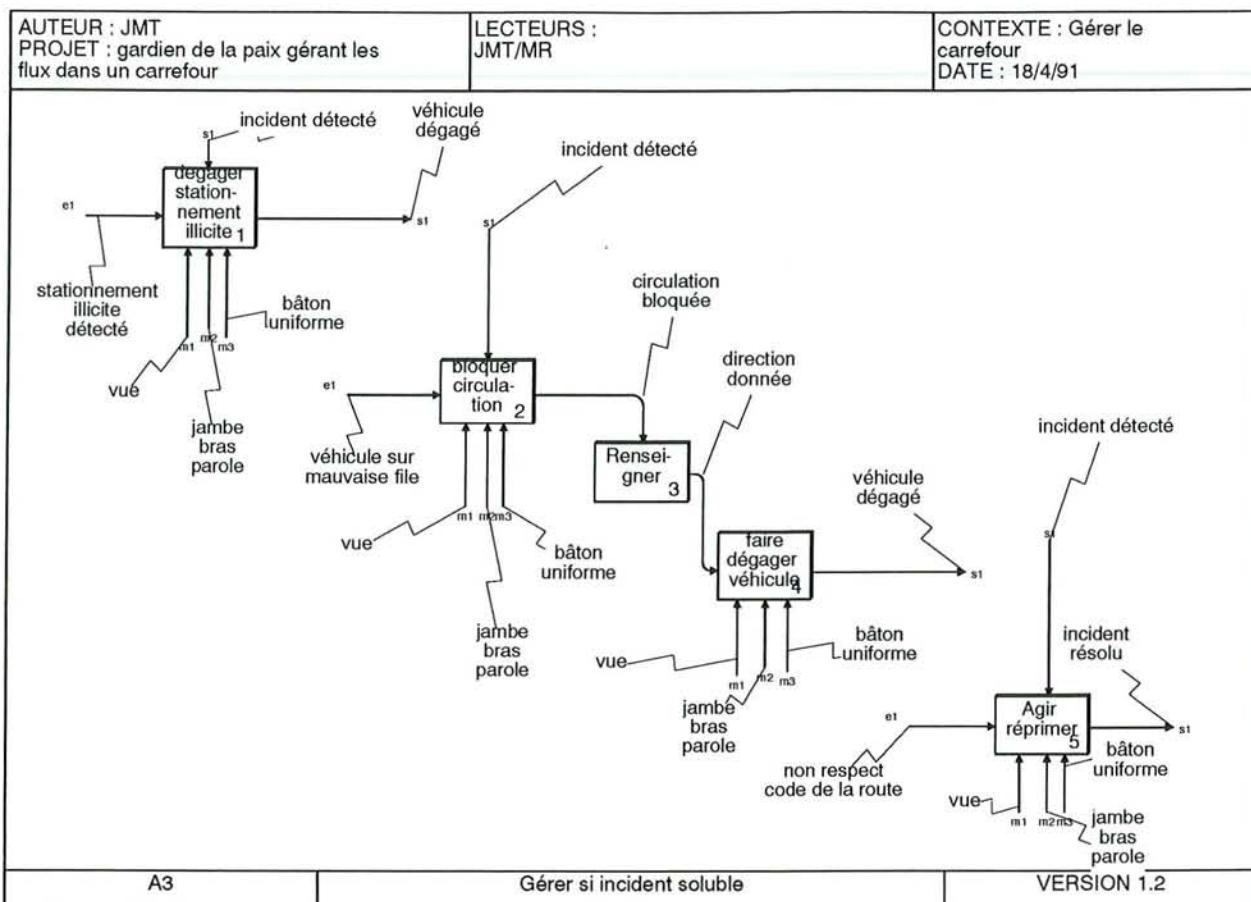
Diagrammes A2 et fils : il s'agit ici de la micro-régulation locale classique.

L'équilibrage de files (diagramme A21) peut être utilisé si des capteurs de remontée de file d'attente existent. Le gardien de la paix peut réaliser cette fonction seul s'il a une vue correcte des files d'attente depuis l'endroit où il se trouve.

La coordination d'axe (diagramme A22) est très classique en macro-régulation mais l'est beaucoup moins en micro-régulation. En effet, il faut un dialogue entre les carrefours pour que chacun sache à quel moment le carrefour amont va libérer un flot de véhicules et donc faire de la coordination si cela est judicieux, pour effectuer des économies d'énergie, par exemple. PRODYN* utilise une technique de ce genre. Le gardien de la paix est tout à fait capable de remplir cette fonction en décidant de laisser passer une file ou un peloton de véhicules qui est en train d'arriver en direction du carrefour. Cet aspect sécurité est difficile à intégrer dans les systèmes de régulation actuels.

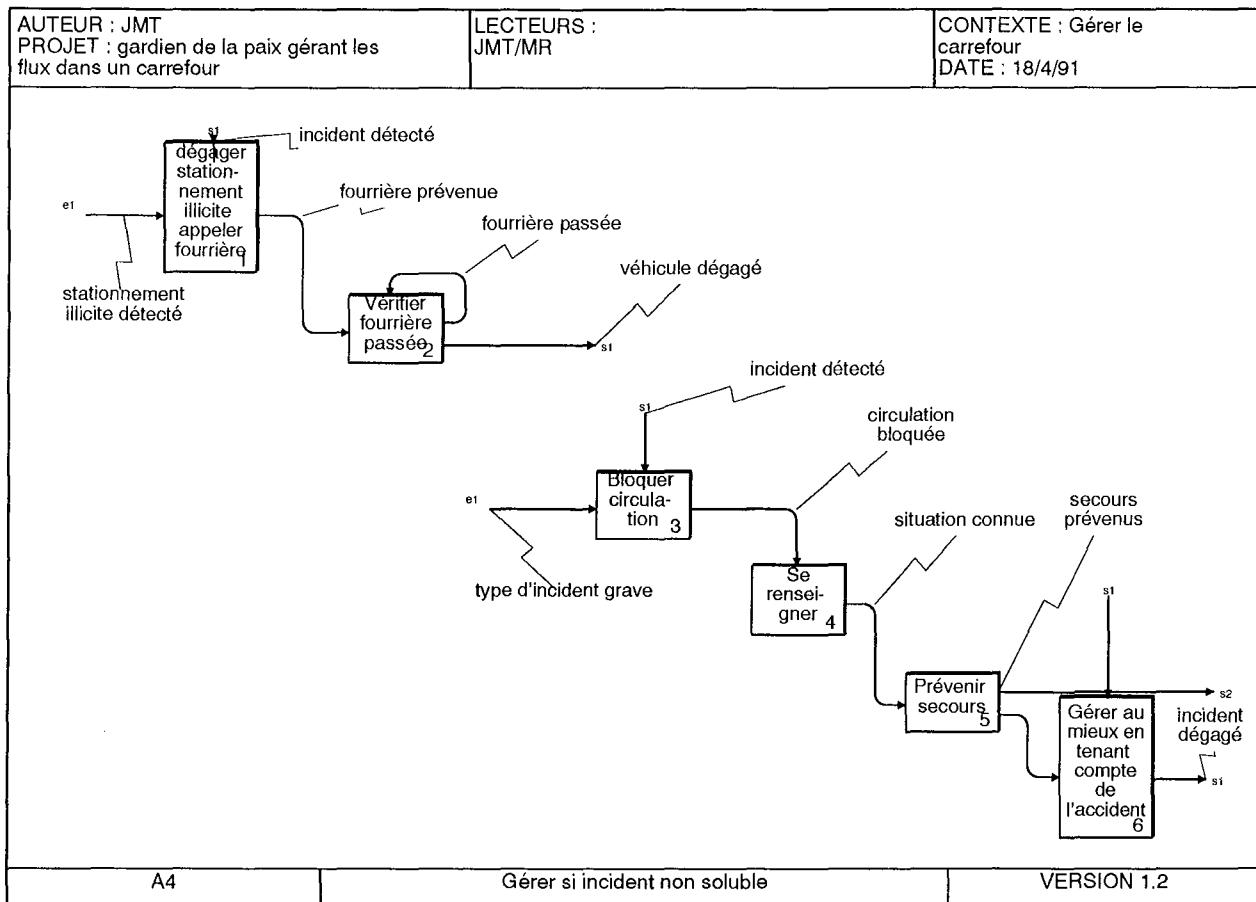
La priorité à donner aux transports en commun (diagramme A23) est très bien faite par le gardien de la paix comme par le système de régulation, aussi bien en décision locale (dialogue bus-carrefour, décision du gardien de la paix) que globale (dialogue SAE*-ordinateur de trafic, demande par radio dans le cas du gardien de la paix).

La rétention de véhicules (diagramme A24) est une technique très utilisée en macro-régulation mais pas en micro à cause des problèmes de capteurs et de dialogues entre carrefours. Le gardien de la paix est tout à fait capable de faire de la rétention de véhicules de sa propre initiative s'il s'aperçoit que les véhicules qui entrent dans son carrefour ne pourront pas l'évacuer.



Diagrams A3 et fils : incidents solubles

L'incident soluble est par définition un incident que le gardien de la paix peut résoudre de sa propre initiative, sans intervention extérieure (renseigner un usager perdu, bloquer la circulation pour lui permettre de se remettre dans la bonne file, dégager un stationnement illicite, réprimer). Ces fonctions sont impossibles à prendre en compte dans le cadre d'un système de régulation de trafic urbain à cause du manque d'informations et de moyens d'actions possibles.



Diagrammes A4 et fils : incidents non solubles

Par définition, ce type d'incident nécessite une intervention extérieure au gardien de la paix (CRS, secours, fourrière). Toutefois, ce dernier est capable d'agir sur la régulation pour adapter la circulation au fait qu'une partie du carrefour soit bloquée par un accident ou des travaux. Le système de régulation du trafic urbain ne pourra, dans le meilleur des cas, prendre en compte que les travaux prévus, à condition de l'informer de la modification de la géométrie de la voirie.

Des actions comme la minimisation des temps de parcours ne peuvent s'appliquer qu'en macro-régulation et le gardien de la paix est par conséquent incapable de les pratiquer seul.

Diagrammes A5 et A6 : gérer sur ordre du poste central :

Cette fonction symbolise la macro-régulation vue du carrefour, c'est-à-dire les ordres de fonctionnement, tels que bloquer un axe, privilégier un axe, laisser passer un cortège ou un véhicule de secours, ordres qui émanent du poste central et qui sont censés prendre la main sur le fonctionnement en mode local. Un système de régulation de même qu'un gardien de la paix relié par radio à son poste central disposent de cette fonction. Le gardien de la paix pourra interagir avec le poste central pour envoyer des informations et, le cas échéant, pour reprendre

la main localement. Les systèmes de régulation centralisés intègrent rarement la micro-régulation.

4.4.3 Autres aspects de comparaison gardien de la paix - système de régulation électronique

Le gardien de la paix aura des moyens d'agir localement pour résorber la saturation plus efficacement qu'un système de régulation.

Le dialogue se fait par des mouvements de bras et de bâton, voire par la parole dans le cas du gardien de la paix, en lieu et place du feu tricolore. Les usagers ont besoin, dans les deux cas, de connaître la signification du langage. Il faut également ajouter l'aspect psychologique de l'uniforme porté par le gardien de la paix.

Le gardien de la paix peut encore renseigner un usager sur son itinéraire et peut donc résoudre les conflits de tourne-à-gauche et tourne-à-droite de manière efficace de même que les mouvements piétonniers.

4.4.4 Conclusion

L'agent agit en appliquant les règles de micro et macro-régulation :

- en période fluide : micro-régulation et macro-régulation pour la coordination,
- en période de saturation : plutôt macro-régulation (la micro n'est pas très efficace).

Des comparaisons entre agent et système, il est ressorti que le gardien de la paix se comportait de la même manière que le système de régulation dans la mesure où tous les deux pouvaient fonctionner en micro-régulation sans problème quand le trafic est fluide. Cependant la macro-régulation, que le gardien de la paix ne peut pas pratiquer seul, est indispensable pour les situations de trafic saturées. Par conséquent, une stratégie centralisée est plus performante lorsque la situation de trafic est déjà complètement dégradée.

Par contre, le gardien de la paix sera beaucoup plus efficace lors de la dégradation de la circulation car il peut intervenir à l'origine même d'une anomalie, si celle-ci provient de son carrefour. Il pourra, plus particulièrement, agir dès l'apparition de l'incident qu'il pourra le plus souvent résorber seul et donc empêcher la saturation redoutée. Il faut noter que pour cette situation il sera vraiment très difficile de concevoir un système de régulation aussi performant qu'un gardien de la paix.

4.5 Tableau comparatif de divers systèmes

Nous vous proposons ici un tableau comparatif entre :

- ❶ un gardien de la paix régulant un carrefour en liaison radio avec un poste central,
- ❷ le système de régulation de Bordeaux, représentatif du système GERTRUDE*. Celui-ci dispose de neuf installations en France au début de 1992,
- ❸ le système de Nancy, représentatif de SIEMENS. Ce dernier dispose de cinq installations en France au début de 1992,
- ❹ le système de Paris, représentatif de CGA*. Celui-ci est complété par un système de détection d'anomalies par intelligence artificielle SAGE*. Une trentaine de ville françaises sont équipées par CGA au début de 1992,
- ❺ le système PRODYN*, système de cinquième type, développé à la ZELT* de Toulouse et maintenant en phase de commercialisation,
- ❻ une proposition de système futur tel qu'il est décrit dans un précédent paragraphe {§ 4.3}.

Les systèmes de Bordeaux, Nancy et Paris ainsi que le système PRODYN sont décrits plus en détail dans le présent document {Annexe A}.

	<i>Gardien de la paix</i>	<i>Système de Bordeaux (GERTRUDE)</i>	<i>Système de Nancy (SIEMENS)</i>	<i>Système de Paris (CGA)</i>	<i>PRODYN</i>	<i>Système futur</i>
<i>Carref. régulés</i>	1	400	140	450	30	
<i>Mesures</i>	Vue, ouïe.	2300 boucles magnétiques.	200 boucles magnétiques. 20 caméras.	600 boucles magnétiques. Environ 70 caméras.	Boucles magnétiques (5 à 6 par carrefour en moyenne).	Boucles magnétiques, éventuellement, ou autre capteurs de comptage. Informations en provenance du système de guidage. Caméra et traitement d'images.

- ❷ en ce qui concerne les boucles magnétiques, le nombre de boucles est directement fonction de la stratégie utilisée. Les stratégies basées uniquement ou quasiment sur la macro-régulation utilisent environ 1 boucle et demie par carrefour (Nancy, Paris), tandis que les stratégies utilisant la micro-régulation nécessitent 5 à 6 boucles par carrefour (GERTRUDE*, PRODYN*). Il est à noter que certains systèmes CGA intègrent une micro-régulation, jusqu'ici semble-t-il non centralisée, et peuvent atteindre dans ce cas un nombre plus important de boucles par carrefour (Le Mans, Nantes, ...) qu'à Paris.

	<i>Gardien de la paix</i>	<i>Système de Bordeaux</i>	<i>Système de Nancy</i>	<i>Système de Paris</i>	<i>PRODYN</i>	<i>Système futur</i>
<i>Informations utilisées</i>	Etat de circulation visible. Etats de circulation à d'autres endroits connus par la réception de messages radio. Géographie du quartier / de la ville. Expérience du gardien de la paix.	Nombre de véhicules passant par point de mesures. Remontées de file d'attente. Taux d'occupation par point de mesures. Coordinations d'axes préprogrammées. Zones de rétention prédéfinies.			Variables d'état du système : - longueur de file, - débit, - distance entre lignes de feux et fin de la file d'attente.	Localisation et prévision d'itinéraires des véhicules. Base de connaissance sur les évolutions de trafic passées. Géographie de la zone régulée.
<i>Organisation du système</i>	hiérarchisée (connexion radio entre gardien de la paix et poste central).	hiérarchisée, 26 zones.	centralisée.	Système hiérarchisé.	Système hiérarchisé, éclaté au niveau du carrefour.	Système hiérarchisé, dialogue interactif avec le système de guidage.
<i>Dysfonctionnements</i>	Ennui du gardien. Défauts radio. Fatigue, subjectivité.			Défauts de capteurs ou de transmission. Défauts d'ordinateur.		
<i>Remèdes</i>	Rotation de personnels, pas de période trop longue sur le terrain, motivation des personnels...	Le système ne tient plus compte de l'information du capteur pour sa stratégie si son état n'a pas évolué depuis trop longtemps. Ordinateur de secours (sur certains systèmes : stratégie de pilotage en local avec conservation des coordinations).				Capteur de trafic intelligent capable d'envoyer une information validée et précalculée.
<i>Transmissions</i>	Ondes radio.	Ligne directe entre contrôleurs et poste central.		Ligne directe (pour la version expérimentale) avec les contrôleurs centralisés au poste central.		Réseau de type RUCOMM.
<i>Liaison flottes particulières (bus, taxis, secours, ...)</i>	Prise en compte possible par l'agent de circulation (en local ou sur ordre PC).	Possibilité d'itinéraires spéciaux véhicules secours. Possibilité de liaison SAE-UTCS*.	Dialogue bus-carrefour en local (DAN). Dialogue SAE-UTCS (système de régulation).	Possibilité de liaison SAE-UTCS.	Un bus est considéré comme l'équivalent de plusieurs véhicules particuliers par la stratégie.	Prise en compte de ces véhicules gérés comme tous les autres par le système de guidage. Possibilité de les réguler avec des priorités différentes.

	Gardien de la paix	Système de Bordeaux	Système de Nancy	Système de Paris	PRODYN	Système futur
Stratégie	EN LOCAL Surveillance carrefour. Equilibrage de files. Coordination locale. Priorité transports en commun et secours possible. Rétention de véhicules. Dégagement de stationnement illicite. Blocage de certaines voies pour en privilégier d'autres. Adaptativité totale, y compris modification locale et temporaire du tracé de la voirie. SUR ORDRE PC: Coordination. Rétention d'axes. Distribution des priorités.	EN LOCAL Possibilité de décision dans le cadre de la stratégie globale. CENTRALISÉ Choix des squelettes de plans de feux. Priorité transports en commun et secours possible.	CENTRALISÉ Multiprogrammation. Méthode des seuils. Choix horaire. Coordination centralisée d'axes.	CENTRALISÉ Multiprogrammation. Méthode des seuils. Choix horaire. Méthode du vecteur. Coordination centralisée d'axes. Priorité transports en commun possible.	Prédiction sur un horizon glissant. Coordination locale. Priorité transport en commun (expérimentation)	Coordination locale ou centralisée en donnant des niveaux de priorité à des pelotons de véhicules, des transports en commun ou des véhicules de secours. La coordination peut ne pas être axiale. Surveillance automatique par traitement d'images des zones sensibles pour valider les informations provenant du système de guidage. Détections d'anomalies, de stationnement illicite et d'accidents possibles par analyse de la différence entre positions théorique et réelle des véhicules. Ceci donné par le système de guidage interactif, par traitement d'images, par analyse de signaux ou par système expert.
Pollution / Bruit	Subjectif.	Prise en compte pour limiter la rétention dans certaines zones.		Pourrait être pris en compte.		Peut être pris en compte.
Fonctionnalités annexes	Informier. Réprimer (fourrière, PV). Appel secours. Aspect "psychologique" : peur du gendarme.					Possibilité de faire appel à des secours ou des services de police dans certains cas mais il paraît difficile de faire une gestion complète des incidents entièrement automatisée.
Intégration des piétons	Vision des piétons. Gestion des piétons au même titre que les autres usagers.		Prise en compte par bouton poussoir ou en "aveugle".			Prise en compte des piétons par traitement d'images ou par capteur type "pédale" au sol.

4.6 Adaptativité au cas nancéien

Nous avons tenté de répondre à la question de savoir quels pouvaient être les avantages ou les inconvénients à utiliser un système de régulation plutôt qu'un autre sur le site nancéien et les contraintes induites par chacun de ces systèmes.

Il est très difficile de définir quel pourrait être le système idéal dans la mesure où, d'une part les confrontations entre diverses stratégies existantes n'ont quasiment jamais eu lieu, d'autre part même si elles avaient eu lieu, les critères de comparaison et le poids respectif de chaque situation ne sont pas aisés à déterminer.

En ce qui concerne l'adaptativité au cas nancéien, tous les systèmes sont a priori adaptables mais tous nécessitent une étude d'implantation sur le terrain (interface contrôleurs, périphériques, ...) après avoir pris en compte la politique de circulation.

Le choix entre les diverses solutions va dépendre du financement que la ville ou l'agglomération nancéenne va pouvoir consacrer, sachant que :

- * La solution du gardien de la paix paraît très peu "actuelle" et n'est guère envisageable qu'en cas de problème.
- * Le système GERTRUDE semble relativement performant, il est accompagné lors de l'installation sur le terrain d'une étude d'adaptation. Par contre, l'investissement en génie civil est important (grand nombre de boucles magnétiques).
- * Les systèmes SIEMENS et CGA semblent assez comparables et ont largement fait leurs preuves.
- * PRODYN nécessite, comme GERTRUDE, une infrastructure en génie civil assez importante.
- * Le système futur est plutôt un axe de recherche qu'une version commerciale à court ou moyen terme. En fait, cette solution n'est envisageable que si la municipalité, ou le district, veut faire de Nancy une ville, ou agglomération, pilote.

Nous allons maintenant tenter de répondre aux questions quoi ? pourquoi ? et comment ? pour nous permettre de mieux cerner le problème.

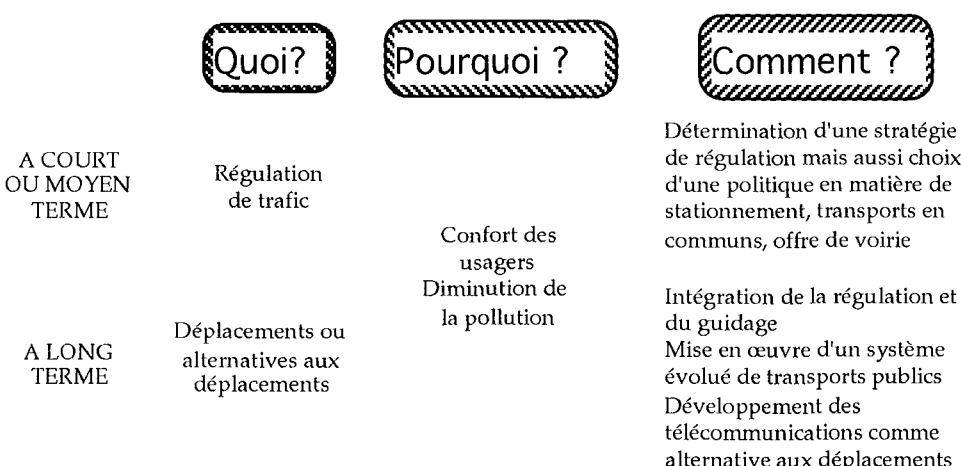


Figure 4.6 :
Evolutions futures

Dans un premier temps, nous pensons qu'un système traditionnel tel que le système actuel assure fort bien sa tâche pour la majeure partie des événements et des lieux. Il pourrait toutefois être intéressant d'instrumenter un peu plus la zone sensible dite du "carré magique" (autour des carrefours 19 et 38) en vue d'expérimenter une stratégie plus fine (type PRODYN ou autre).

A plus long terme, il pourrait être intéressant de s'orienter vers le guidage et l'intégration du guidage et de la régulation.

5. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire un tour d'horizon de l'état actuel de l'art dans le domaine de la régulation du trafic urbain. Nous avons étudié les principaux systèmes de régulation existant en France et dans le monde ainsi que les recherches actuellement menées dans ce domaine et les domaines connexes. Notre contribution dans cette partie consiste à classer les principaux types de stratégies de macro-régulation et les systèmes afférents. Le présent chapitre se contente de rappeler les principaux résultats de cette étude sur la régulation du trafic urbain dont l'essentiel se trouve détaillé dans un autre rapport [Thiriet & al. 92].

Nous avons proposé un tableau comparatif entre les systèmes de régulation traditionnels, le système PRODYN*, un gardien de la paix assurant la circulation dans un carrefour et un système futur intégrant toutes les potentialités que nous laisse entrevoir la recherche.

Nous avons pu voir que ce "système futur" remettait en cause tout un ensemble de fonctionnalités qui vont du principe de transmission ou de la stratégie de régulation, jusqu'à la liberté d'utiliser son véhicule personnel en zone urbaine. Le fait d'être enregistré sur une caméra en traversant une chaussée soulève également le problème de l'utilisation qui peut être faite de ces images en relation avec la liberté individuelle.

Le système routier urbain est un processus particulier puisqu'il intègre l'être humain comme maillon incontournable et obéit de ce fait à des contraintes spécifiques.

L'ensemble de ces réflexions permet de proposer des éléments de réponse au problème de l'évolution ou du remplacement du système de régulation du trafic implanté à Nancy.

Références bibliographiques de la première partie

- [Al-Khalili 85] A. J. Al-Khalili - Urban traffic control - a general approach - *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*, vol. 15, n° 2, 1985, pp.260-271.
- [Annales 90] GERTRUDE défie les embouteillages - *Annales de la voirie et de l'environnement*, n° 1484, 1990, pp. 18-19.
- [Batanovic 89] V. Batanovic - Multicriteria evaluation of an urban traffic control system - Belgrade case study - *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 12, n° 10/11, 1989, pp.1411-1417.
- [Bell & al. 91] M.C. Bell, G. Scemama & L.J. Ibbetson - CLAIRE : an expert system for congestion management - *Advanced Telematics in Road Transport*, Bruxelles, février 1991, pp.596-614.
- [Bielli 91] M. Bielli - Artificial intelligence techniques for urban traffic control - *Transportation Research, Part A*, vol. 25, n° 5, 1991, pp. 319-325.
- [Bonvalet & al. 87] F. Bonvalet, G. Delthil - La régulation des feux à Paris - *Transport Environnement Circulation*, n°84/85, 1987, pp.41-45.
- [Braudel] F. Braudel - De l'identité de la France.
- [Bretherton & al. 90] R.D. Bretherton & G.T. Bowen - Recent enhancement to SCOOT - SCOOT version 2.4 - Conference IEE, "Road Traffic Control", may 1990, pp.95-98.
- [Capitaine & al. 87] B. Capitaine, B. Foraste & G. Scemama - Un système expert pour le traitement de la congestion du trafic urbain - *Transport Environnement Circulation*, n° 84/85, décembre 1987, pp. 47-49.
- [CEGELEC 88] Régulation des feux : le système SAIGE en action à Paris - Notice CEGELEC/CGA, 1988, 2 pages.
- [CETE 88] Analyse et suivi de la circulation urbaine : la problématique au niveau des collectivités locales - CETE Normandie-centre, Grand-Quevilly, août 1988, 53 pages.
- [CETE & CETUR] Compatibilité micro-macro régulation : rapport de préétude - CETE, Rouen & CETUR, Bagneux, 49 pages.
- [Cohen 86] S. Cohen - Régulation du trafic aux heures de pointe : optimisation et approche locale, le cas d'Aix en Provence - *Transport Environnement Circulation*, n° 77, août 1986, pp. 28-32.
- [Cohen 88] S. Cohen - Régulation du trafic urbain hier, aujourd'hui et demain - *Recherche Transports Sécurité*, n° 20, décembre 1988, pp. 13-20.
- [Cohen 90] S. Cohen - Ingénierie du trafic routier - Presses des Ponts et Chaussées, Paris, 1990, 246 pages.
- [Cohen & al. 86] S. Cohen & M. Danech-Pajouh - Phedre : un outil d'évaluation des conditions de circulation en ville - *Recherche Transports Sécurité*, n° 11, septembre 1986, pp. 37-40.
- [Courbet & al. 84] G. Courbet & C. Dhondt - La régulation du trafic à la communauté urbaine de Lille - *Transport Environnement Circulation*, n° 63, 1984, pp. 20-24.
- [Dély 90] D. Dély - Paris roule-t-il ? - *Transport public*, octobre 1990, pp.18-21.
- [Dhondt & al. 86] C. Dhondt & J. Sehier - Le suivi informatisé de la circulation - *Circulation signalisation transports* (Ingénieurs des villes de France), n° 326, avril 1986, pp. 27-31.
- [Donati & al. 84] F. Donati, V. Mauro, G. Rancolini, M. Vallauri - A hierarchical-decentralized traffic light control system : the first realization : "Progetto Torino" - *9th world congress IFAC, Budapest*, july 1984, 6 pages.
- [DRIVE V1015 90] DRIVE V1015 - Les pratiques de régulation du trafic en milieu urbain - *Recherche*

- Transports Sécurité "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.17-31.*
- [Durgeat & al. 86] A. Durgeat, J. J. Henry, J. B. Lesort, C. Pelissier, J. Sarda - ZELT : Enquête sur les besoins de recherche et de développement - CETUR, Bagneux, 1986, 33 pages.
- [Fantin 86] M. Fantin - L'intelligence artificielle s'empare des carrefours - Sciences et Techniques n° 32, décembre 1986.
- [Farges 91] JL. Farges, I. Kandem & J.B. Lesort - Realization and test of a prototype for real time urban traffic control - Advanced Telematics in Road Transport, Bruxelles, février 1991, pp.527-542.
- [Forasté & al. 86] B. Forasté, G. Scemama - Système expert temps réel d'aide à la gestion du trafic - 6è journées internationales *Les Systèmes Experts et leurs Applications*, Avignon, avril 1986, pp.917-930.
- [Francies 78] C. Francesies - A Bordeaux : une stratégie originale de régulation du trafic (GERTRUDE) - *Le Moniteur des travaux publics*, n° 110, mars 1978, pp. 87-94.
- [Gabard 90] J.F. Gabard - CALIFE : une stratégie adaptative de calcul en ligne de plans de feux sur un réseau urbain - Recherche Transports Sécurité "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.5-11.
- [Gartner 89] N.H. Gartner - OPAC : strategy for demand-responsive decentralized traffic signal control - CCCT'89 IFAC/AFCET, Paris, septembre 1989, pp.499-503.
- [GERFAUT 91] GERFAUT : l'onde verte en Seine-Saint-Denis - Conseil général de Seine-Saint-Denis, 1991, 12 pages.
- [GERTRUDE 80] GERTRUDE : Test d'efficacité du système de régulation de Bordeaux - UTC Bordeaux + CETUR, Bagneux, 1980, 80 pages.
- [GERTRUDE/presse] Gertrude face à la presse - 128 pages.
- [Gnaedinger 91] E. Gnaedinger - Etudes d'architecture et de services d'application pour un réseau de communication multi-services dédié au Génie Urbain - Université de Nancy I (Thèse), Nancy, 1991.
- [Hall & al. 80] M.D. Hall, D. Van Vliet & L.G. Willumsen - SATURN - a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes - Traffic Engineering & Control, n° 4, avril 1980, pp.168-176.
- [Henry & al. 84] J.J. Henry & J.-L. Farges - Commande des feux en temps réel Prodyn - Transport Environnement Circulation, n° 64, 1984, pp. 31-36.
- [Henry & al. 89] J.J. Henry & J.L. Farges - PRODYN - CCCT'89 IFAC/AFCET, Paris, septembre 1989, pp. 505-507.
- [Houdemont 80] P. Houdemont - Suivis d'efficacité des équipements de régulation - Transport Environnement Circulation, n° 39, mars 1980, pp. 53-57.
- [Hunt & al. 81] P.B. Hunt, D.I. Robertson, R.D. Bretherton, R.I. Winton - SCOOT : a traffic responsive method of coordinating signals - TRRL (Digest LR 1014), Crowthorne, 1981, 2 pages.
- [IVHS 91] Fast-Trac officials host FHWA in Bid for funding - Inside IVHS, vol.1, n°5, 1991.
- [IVHS 92] AEG seeks public transport role for Eurotunnel system - Inside IVHS, vol. 2, n°7, 1992.
- [Khoudour & al. 88] L. Khoudour & J. B. Lesort - Analyse du fonctionnement d'un carrefour sous différents modes de régulation - INRETS (rapport n° 73), Arcueil, 1988, 38 pages.
- [Khoudour & al. 90] L. Khoudour, J.B. Lesort, J.L. Farges - PRODYN : trois ans d'expérimentation sur la ZELT - Recherche Transports Sécurité "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.89-99.
- [Le Cocq 71] J.-P. Le Cocq - Commande par le trafic des feux d'un carrefour - SETRA, Bagneux, 1971, 49 pages.
- [Lesort 85] J.B. Lesort - Deux exemples d'expérience en vraie grandeur de régulation de la circulation

- [Lesort 89] J.B. Lesort - La régulation du trafic urbain - *La Recherche*, vol. 20, n° 214, octobre 1989.
- [Lesort 90] J.B. Lesort - Pourquoi mesurer le trafic ? - *RTS* n°28, 1990.
- [Lesort & al. 82] J. B. Lesort & S. Sellam - Applications des techniques d'analyse des données à l'étude du trafic dans un réseau urbain - *Recherche Transports*, n° 40, pp. 16-35, 1982.
- [Lesort & al. 84] J.B. Lesort, Y. David et al. - Régulation centralisée de la circulation en ville - Rapport de recherche de l'*Institut de Recherche des Transports* n° 72, septembre 1984, 149 pages.
- [Lowrie 82] P.R. Lowrie - The Sydney co-ordinated Adaptive Traffic System : principles, methodology, algorithms - *Conference IEE, "Road Traffic Signalling"*, april 1982, pp.67-70.
- [Luk 84] J.Y.K. Luk - Two traffic responsive area traffic control methods : SCAT and SCOOT - *Traffic Engineering and Control*, janvier 1984, pp.14-22.
- [Mathieu & al. 87] S. Mathieu & P. Laffont - Le système de régulation centralisée de la ville de Toulouse - *Transport Environnement Circulation*, n° 83, 1987, pp. 8-12.
- [May & al. 90] A.D. May & K.E. Gardner - Transport policy for London in 2001 : the case for an integrated approach - *Transportation*, vol. 16, 1990, pp.257-277.
- [McGowan & al. 80] J. McGowan, I.J. Fullerton - UTCS development and testing of advanced control strategies in the urban traffic control systems - *Public Roads*, vol. 43, n° 2-4, 1979-80.
- [Morrish 80] D. W. Morrish - Area traffic in Bordeaux : a contrast with British practice - *Traffic engineering and Control*, august-september 1980, pp.433-437.
- [Mowatt & al. 84] A. M. Mowatt & A. D. Young - CITRAC - the first five years - *Traffic Engineering and Control*, mai 1984, 9 pages.
- [Olivero 87] P. Olivero - La zone expérimentale et laboratoire de trafic de Toulouse (ZELT) - *Transport Environnement Circulation*, n° 83, 1987, pp. 32-37.
- [Page 85] A. Page - Exploitation des carrefours à feux (PIAF) - *CETUR*, Bagneux, 1985, 68 pages.
- [Papageorgiou 91] M. Papageorgiou - Expert system approach to road traffic control - *Traffic and transportation systems*, 1991, pp.124-130.
- [Parapanissios 82] A. C. Parapanissios - L'agglomération athénienne, son centre et les transports urbains - *Thèse de 3^e cycle de Paris I Sorbonne, "Géographie : analyse régionale et aménagement du territoire"*, 1982.
- [PARCIVAL] PARCIVAL - CGA, 24 pages.
- [PARIS 87] Ville de Paris : la régulation des feux de signalisation - *Ville de Paris*, octobre 1987, 34 pages.
- [Peugeot Magazine 91] La cité du futur - "Dossier TECHNOLOGIES PSA", *Peugeot Magazine*, n°97, 1991.
- [Ritchie 90] S. G. Ritchie - Expert systems in transportation - *Transportation Research, Part A*, vol. 24, n° 1, 1990, pp. 1-2.
- [Ritchie & al. 91] S.G. Ritchie, N.A. Prosser - A real time expert system approach to freeway incident management - *Transportation Research Board*, 10th annual meeting, 3-17 janvier 1991, 29 pages.
- [Robertson & al. 82] D. I. Robertson & P. B. Hunt - A method of estimating the benefits of co-ordinating signals by Transyt and Scoot - *Traffic engineering and control*, vol. 23, n° 11, 1982, pp. 527-531.
- [Roffet & al. 87] J.-C. Roffet, M. Pierron - NANCY : une politique pour les déplacements urbains : district de Nancy & CGFTE - *CETUR*, Bagneux, 1987, 136 pages.
- [Rousseau & al. 87] P. Rousseau & J. Mezrahid - La régulation centralisée du trafic à Marseille - *Transport Environnement Circulation*, n° 82, 1987, pp. 29-35.
- [Rowe & al. 87] S.E. Rowe, J.M. Okazaki, K. Hu - ATSAC : Evaluation study - *Department of transportation, City of Los Angeles*, July 1987, 12 pages.
- [Rowe 90] S.E. Rowe - ATSAC - *Department of transportation, City of Los Angeles*, 1990, 12

- pages.
- [SADT 89] SADT : un langage pour communiquer - *IGL Technology & Eyrolles*, Paris, 1989, 326 pages.
- [SAGE 89] SAGE : application n° 2 - Systèmes experts et génies urbains : quelques enseignements tirés des premières réalisations en France - *INRETS* (Rapport d'étude), 1988/89, pp. 11-15.
- [Scemama 89] G. Scemama - Réalisation d'un système à base de connaissances pour la gestion du trafic urbain (SAGE) - *Recherche Transports Sécurité*, n° 22, juin 1989, pp. 65-74.
- [Schlabbach 88] K. Schlabbach - Pulsating green waves - the Darmstadt experiment - *Traffic Engineering and Control*, juillet-août 1988, pp.392-397.
- [Schladover & al. 91] S.E. Shladover, C.A. Desoer, J.K. Hedrick, M. Tomizuka, J. Walrand, W.B. Zhang, D.H. MacMahon, H. Peng, S. Sheikholeslam, N. McKeown - Automated vehicle control developments in the PATH program - *IEEE transactions on vehicular technology* - vol.40, n°1, février 1991, pp.114-131.
- [SETRA 75] Equipements de régulation de trafic en milieu urbain : manuel du projeteur - *SETRA*, 1975, 89 pages.
- [SIEMENS 90] Documents SIEMENS - *SIEMENS*, 1990.
- [Thiriet & al. 91] J.M. Thiriet, M. Robert, C. Humbert, J.J. Davaine - Cinq générations de stratégies de régulation du trafic urbain de par le monde - *Transport Environnement Circulation*, n° 109, 1991, pp.32-35.
- [Thiriet & al. 92] J.M. Thiriet & M. Robert - Etude bibliographique : les systèmes de régulation du trafic urbain : Version 2 - *ILGU*, Nancy, 1992, 76 pages.
- [Thuillier 77] J.P. Thuillier - L'amélioration du cadre de vie par l'amélioration des déplacements (Nancy) - pp. 5-39.
- [TRB 88] Year 2020 : a look ahead - *Transportation Research Board, National Research Council* (Special report 220), Washington, 1988, 551 pages.
- [USA 85] Data base on urban traffic control systems - *Federal High Way Administration (FHWA)*, USA, 1985.
- [Vercammen 87] P. Vercammen - La régulation du trafic en Ile de France - *Transport Environnement Circulation*, n°84/85, 1987, pp.9-14.
- [Vichet 78] J. C. Vichet - La régulation du trafic en milieu urbain - *Le moniteur des travaux publics*, n° 20, mai 1978, pp. 53-57.
- [Wiltshire & al. 85] R. Wilshire, R. Black, R. Grochoske, J. Higinbotham - Traffic control systems Handbook - *Federal High Way Administration (FHWA)*, USA, 1985.

*Seconde partie - Détection, localisation et analyse
d'anomalies de trafic et de défauts capteurs*

Chapitre 2 - Anomalies en régulation du trafic urbain

1. Introduction

A l'heure actuelle la circulation urbaine est régulée par ordinateur, tout au moins dans les agglomérations de taille suffisante, ces systèmes sont efficaces tant que nous sommes en régime fluide mais s'avèrent en général dépassés lorsqu'on atteint un état de saturation.

Nous soulevons tout d'abord le problème de la saturation vue globalement. Nous relatons les moyens utilisés par les systèmes existants ou en cours de développement pour tenter d'enrayer ce phénomène. Nous proposons ensuite un dépouillement des données extraites du système de détection d'anomalies qui a été mis en place au poste central de la circulation à Nancy. Enfin, nous exposons une typologie des types d'incidents que l'on peut rencontrer.

2. Saturation

Bibliographie : [UITP 87]

D'après le Centre d'Etudes des Transports Urbains (CETUR), "un élément du réseau est saturé lorsque toute nouvelle dégradation des caractéristiques et/ou une augmentation de la charge introduit une baisse brutale du niveau de service de l'élément du réseau de sa régulation associée" [Texier & al. 82].

Une conduite d'eau ou de gaz ne peut accepter qu'un certain nombre de particules par unité de temps et de volume. Une martensite issue de la trempe d'un acier est contrainte puisque sursaturée en carbone. De la même manière, un réseau viaire est limité par sa configuration quant au nombre maximum de véhicules qu'il peut accepter par unité de temps sur un tronçon.

La résolution du problème de la sous-capacité intrinsèque peut se faire de deux façons, soit par un développement du réseau viaire soit par une diminution du nombre de véhicules empruntant ce réseau viaire [Goodwin 89] [Morin 82].

2.1 Traitement de la saturation - considérations générales

La saturation prend naissance, en général, dans des zones où l'offre n'est pas uniforme

(passage de 3 à 2 voies) ou à l'endroit où la demande n'est pas uniforme (arrivée d'une transversale) [Texier & al. 82]. Nous pouvons distinguer la situation chargée dans laquelle le niveau de service se dégrade de façon continue et l'apparition de la saturation traduite par une rupture brusque du niveau de service moyen.

Les mesures **préventives** de la saturation consistent à augmenter l'offre du réseau et de la régulation de façon à ce que l'offre reste supérieure à la demande. Les mesures **curatives** consistent à maîtriser et améliorer le niveau de service lorsque la demande instantanée est supérieure à l'offre. Dans ce cas, il s'agit de reporter l'excédent de la demande dans les zones où la saturation est artificiellement créée et contrôlée : là où l'offre est la moins dépendante de la demande [Texier & al. 82 page 29]. Cette technique est utilisée par la plupart des systèmes pour la mise en place de zones de rétention.

Un des problèmes majeurs en régulation du trafic urbain est qu'il faut tenir compte du fait que les usagers ne sont pas des automates et qu'ils se comportent comme "bon leur semble". Il est malgré tout nécessaire de les inciter à se conduire de la manière adéquate pour que le processus fonctionne. Ils sont par conséquent contraints par des panneaux, des feux tricolores ou des marquages sur la chaussée, par exemple. Pour que ces contraintes soient efficaces, il ne faut pas qu'elles s'éloignent trop des comportements "naturels".

Causes de la saturation

Certains auteurs [Rathi 88] se sont penchés sur les causes de la saturation. Rathi en énumère quelques-unes :

- ◆ temps de vert inadapté pour la traversée des véhicules,
- ◆ stationnement trop intense le long des voies (blocage de la voirie par des stationnements illicites sur la voirie de déplacement, anomalies dues aux véhicules manœuvrant entre la place de stationnement le long de la voirie et la voirie elle-même),
- ◆ remontée de file aux carrefours amont avec blocage du chaînon^{*} intermédiaire,
- ◆ conflits véhicules-piétons en tourne-à-droite,
- ◆ indiscipline des piétons (non respect des signalisations lumineuses),
- ◆ capacité de stockage des véhicules limitée dans certaines zones,
- ◆ schéma de circulation (tourne-à-gauche, convergence de plusieurs voies en une seule, ...).

De forts ralentissements dus à la météo ou à une grande densité de trafic peuvent entraîner ce type de situations.

Indicateurs de prise en compte de la saturation

Le système expert CLAIRE [Bell & al. 91] convertit les données émanant du système de

régulation en indicateurs de saturation. Ces valeurs sont transformées en valeurs quantitatives donnant des états de congestion (bas, intermédiaire, élevé). A partir de là on en déduit l'état du chaînon (fluide, saturé, inconnu).

2.2 Développement du réseau viaire

Bibliographie : [Buatois 86] [Franceries 78] [Lindley 87]

Cette méthode consiste à aménager le réseau pour qu'il y ait moins de véhicules susceptibles de traverser les zones surchargées. Différentes solutions sont possibles :

- * **Les voies de transit ou voies de contournement** : ce sont des voies qui restent à l'extérieur du périmètre urbain. Cette méthode est intéressante pour éviter la traversée de la ville par les usagers en transit [IVF 83a].
- * **Les voies rapides urbaines** : ce sont des voies qui permettent de relier rapidement un point de la ville à un autre. Ces voies peuvent utiliser une infrastructure spécifique telle que des tunnels (projet LASER à Paris [Lemperiere & al. 89], Nice [Beaumelle & al. 88]) ou des viaducs (Nice) [Marcillon 86].
- * **L'affectation variable des voies de la circulation** [CETUR 84] : la voie centrale peut avoir l'un ou l'autre des sens de circulation en fonction du moment mais passe toujours par une période de rouge intégral¹⁰ permettant de dégager celle-ci avant le changement de sens [IVF 83a]. Cette technique est utilisable dans des villes dortoirs où le trafic a un sens privilégié le matin et un sens privilégié inverse le soir. L'intérêt est que l'on modifie peu le réseau viaire tout en optimisant son utilisation.

L'ingénieur de trafic peut également jouer sur la capacité des chaînons : après étude des conditions de circulation, il peut dégager des chaînons excédentaires et déficitaires, il pourra alors utiliser ceux-ci pour rééquilibrer l'ensemble [Texier & al. 82] :

- * Augmentation de la capacité des chaînons déficitaires par l'élargissement, la modification du stationnement ou la suppression d'un couloir bus lorsqu'on est sûr de pouvoir garantir la fluidité dans le chaînon.
- * Apparition de chaînons excédentaires : ceux-ci peuvent être utilisés pour créer des zones de rétention, pour élargir des trottoirs, créer des pistes cyclables ou des stationnements en épis.

¹⁰Etat de repos de tous les feux d'un carrefour au rouge

2.3 Diminution du nombre de véhicules qui empruntent le réseau

Cette alternative consiste essentiellement à dissuader les automobilistes d'utiliser leurs voitures particulières.

Une ville comme Brême, en Allemagne, [UITP 87] a mis en place un système de grands parcs à la périphérie de la ville. Les voitures doivent s'y garer, les usagers poursuivent leur chemin en deux roues ou en autobus. En effet, ces véhicules sont, avec les véhicules de sécurité, les seuls à être autorisés à pénétrer dans l'hyper-centre. Cette technique est également partiellement mise en place à Bordeaux et Paris [IVF 83b].

Naples ou Bologne protègent leurs centres ville de la saturation par un système de labyrinthe qui fait qu'aller au centre ville avec sa voiture particulière devient un véritable casse-tête [UITP 87].

Athènes régule son trafic en permettant aux voitures de rouler seulement un jour sur deux, en fonction de leurs plaques minéralogiques.

Singapour et Hong Kong mettent en place des systèmes de péage routier urbain (S.T.E. : système de tarification électronique de la voirie) avec des tarifs variables en fonction de la plage horaire et de l'itinéraire emprunté [UITP 87] [Pretty 88].

Des panneaux à affichage variable peuvent être utilisés pour indiquer qu'un parc de stationnement est complet. Il devient donc inutile de s'aventurer dans sa direction, ceci étant la première phase de guidage [Cohen 90] [Sanchez & al. 86] [Texier & al. 82 page 36] [TRRL].

Dissuader les voitures particulières de rouler est un objectif attrayant mais, pour que la dissuasion soit crédible et efficace, il faut proposer des alternatives intéressantes, essentiellement de type transports en commun, bien organisés et bon marché. Si ces conditions ne sont pas remplies, les utilisateurs essaieront toujours de contourner la loi.

Pour mieux comprendre les problèmes de saturation, il est intéressant de noter qu'une étude du Westminster Council a montré que, sur une population d'habitants dans le centre de Londres, les trajets individuels moyens étaient plus longs de 5 % que les trajets minimaux correspondants. De même, le nombre de croisements était augmenté de 12 % par rapport à ce qu'ils auraient été si tous les usagers avaient emprunté les itinéraires minimaux [Texier & al. 82 page 37]. Optimiser les trajets des utilisateurs peut conduire à la réduction du nombre de véhicules sur le réseau : c'est cette méthode qui est utilisée par les systèmes de guidage.

2.4 Prise en compte de la saturation dans les systèmes de régulation

La prise en compte des situations anormales par les systèmes de régulation existant ou par les systèmes actuellement en cours de développement s'effectue en général par la mise en place

de plans de feux¹¹ anti-saturation*, soit automatiquement (méthode des seuils ou choix par horloge [Texier & al. 82 chap. 4]) soit manuellement. Des recherches sont en cours pour éviter l'intervention manuelle, c'est ce que nous verrons dans les sous-paragraphes suivants.

*2.4.1 Traitement *a posteriori* de la saturation*

Les solutions présentées ici permettent de prendre en compte un état dégradé de trafic et ont pour objectif d'améliorer la fluidité.

Paris expérimente le système SAGE* (ou SAIGE) qui pilote le système de régulation en cas de saturation. SAIGE est un système expert qui doit pouvoir remplacer l'opérateur manuel en décidant de mettre en place tel ou tel plan de feux anti-saturation {Annexe A §3} [Capitaine & al. 87] [Scemama 89].

Les américains ont expérimenté (expérience UTCS¹² Control), à Washington et à la Nouvelle-Orléans, des stratégies de seconde génération qui devaient pouvoir gérer les problèmes de saturation mais elles se sont soldées par un échec [Lesort 85].

Quatre stratégies de régulation du trafic aux heures de pointe sont testées par Cohen [Cohen 86] : THEBES (plans de feux fixes optimisés), une onde verte, un algorithme adaptatif et une certaine désynchronisation des carrefours. Il semblerait que les deux premières méthodes soient plus efficaces que les deux autres dans la majeure partie des situations. Cela voudrait dire que ce ne sont pas forcément les stratégies les plus sophistiquées qui sont les meilleures. Cette conséquence va à l'encontre de celle tirée par les britanniques dans la comparaison entre SCOOT* et les systèmes classiques basés sur TRANSYT* [Robertson & al. 82].

*2.4.2 Traitement *a priori* de la saturation*

L'idéal est, bien sûr, d'essayer d'avoir un système suffisamment efficace pour pouvoir anticiper les saturations éventuelles.

Les systèmes utilisant des stratégies du quatrième (SCOOT*) ou cinquième type (OPAC*, PRODYN*, UTOPIA*) optimisent le passage de tous les véhicules présents sur le carrefour et ceci pour chaque carrefour. Cette optimisation intervient quel que soit l'état de fluidité du trafic. SCOOT, par exemple, semble être capable de s'adapter à une situation particulière puisque le 24 février 1983, un camion-citerne ayant déversé de l'acide fluoridrique, une rue de Coventry a dû être complètement fermée à la circulation de 15H30 à 18H30. SCOOT a alors réalloué les temps de vert sur l'itinéraire de contournement [Hunt & al. 85].

Plusieurs projets de systèmes de guidage ou d'information sont en cours avec l'objectif

¹¹Programme de séquencement des feux tricolores

¹²Urban Traffic Control System

de diminuer le risque de saturation. L'intérêt de tels systèmes est double :

- D'une part, les véhicules équipés passeront de 10 à 20 % de temps en moins sur le réseau, d'après deux études indépendantes menées aux Etats-Unis et au Royaume-Uni.
- D'autre part, les autres véhicules bénéficieront de la réduction globale de la congestion.

Il existe trois types de guidages :

- ◆ Le guidage **statique** : il consiste tout simplement en panneaux indicateurs fixes.
- ◆ Le guidage **dynamique** : il tient compte de l'état du trafic et envoie aux utilisateurs des informations évolutives. Il se sert de panneaux à messages variables, de messages radiophoniques et même de systèmes d'information embarqués qui sont en cours de développement dans le cadre des projets DRIVE (SOCRATES [Aron & al. 90]) ou PROMETHEUS* [Dobias 88] [Prometheus 91]. Nous mentionnerons également CARMINAT [Aron & al. 90] en France et NAC-200 au Japon [IVHS 92].
- ◆ Le guidage **interactif** ou guidage proprement dit : il intègre un dialogue constant entre les véhicules et le système. Il est appelé à se développer en milieu urbain. Les systèmes de ce type les plus connus sont le projet DRIVE EURO-SCOUT (ALI-SCOUT* à Berlin à l'origine et ses dérivés ULIISSE à Lyon et AUTOGUIDE à Londres), ainsi que les systèmes CACS au Japon et ETAK/TRAVELPILOT aux Etats-Unis.

Bibliographie : [Aron & al. 90] [Buxton & al. 91] [Catling 89] [Cohen 90] [Fletcher 89] [Foster 87] [French 88] [Hoffmann & al. 90] [Laurent 90] [Taylor 90] [Tsuiji & al. 85] [Uliisse 89] [van Aerde & al. 90] [von Tomkewitsch].

Nous pouvons constater que des expériences ont été tentées dans le passé pour essayer de prendre le mieux possible en compte les états dégradés de circulation. Ces tentatives qui consistaient à sophistiquer le système de commande se sont en général soldées par des échecs. Il n'empêche qu'un certain regain d'intérêt apparaît aujourd'hui pour ces techniques avec l'intelligence artificielle ou le développement de nouveaux modèles de simulation. De plus, l'évolution matérielle permet désormais leur application en temps réel.

3. Analyse des anomalies d'après les données provenant du système de détection du poste central de la circulation à Nancy

Suite au dépouillement des données fournies par le système de caméras décrit dans ce mémoire {Annexe A §2.3}, nous avons distingué deux types d'anomalies qui sont différentes dans leur comportement et dans le traitement éventuel que l'on peut leur apporter, les anomalies chroniques et les anomalies accidentnelles.

3.1 Anomalies chroniques

Les anomalies chroniques sont dues à une sous-capacité intrinsèque du réseau : ce sont celles qui sont le plus souvent étudiées dans les traités sur la saturation. Elles se caractérisent par une périodicité qui peut être quotidienne ou hebdomadaire et sont donc prévisibles. Les moyens de traitement sont en général connus (ex : sens unique, ...) et nous n'y reviendrons pas. Les anomalies chroniques correspondent aux cas A et B cités par Morin [Morin 82].

Ce type d'anomalies est aisément mis en évidence par le traçage d'histogrammes {chap.4 §3.1.2}, à la fois dans les domaines spatiaux et temporels.

Nous nous apercevons naturellement de l'existence des pointes du matin et du soir. Nous pouvons aussi avoir une idée des rues les plus chargées et des jours les plus chargés.

3.2 Anomalies accidentelles

Les anomalies accidentelles sont dues à un incident dans la circulation tel que livraison, panne d'un véhicule sur la chaussée, véhicule mal stationné, travaux... Ce type d'anomalies est purement aléatoire. Notre objectif est de mettre en évidence les conditions qui conduisent à une anomalie de ce type afin de prédire avec un certain pourcentage d'erreur son apparition. Les anomalies accidentelles correspondent au cas C cité par Morin [Morin 82].

Dans les histogrammes étudiés {chap.4 §3.1.2}, nous pouvons considérer que les anomalies détectées à 20 heures sont des anomalies accidentelles tandis que celles de 17 heures sont chroniques.

4. Classification d'incidents

Nous allons voir, dans le présent paragraphe, comment il est possible de classer les anomalies. Les trois premiers sous-paragraphes explicitent divers défauts pouvant être à l'origine de l'altération des signaux, le dernier propose une reconnaissance des anomalies par analyse des signaux.

4.1 Anomalies de trafic

Dans cette partie, nous allons faire une énumération d'un certain nombre d'anomalies

possibles qui seront classées en fonction de leur "matérialisation" sur les signaux dans un prochain paragraphe {§4.4}.

Type d'incidents	Manifestation	Détection	Durée
accidents	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO* en augmentation & NV* en diminution sur les voies bloquées	longue
stationnement illicite	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	indéterminée
déménagements	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	longue
livraison	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	longue
travaux	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	longue
changement de file	Ralentissement	?	très courte
voiture qui cale au démarrage	Retard au démarrage	Non comptage de véhicules en début de phase*	courte
arrêt interdit (marche arrière à contre-sens)	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	courte
traversée piétons	Blocage d'une ou plusieurs voies	TO en augmentation & NV en diminution	courte
convoi exceptionnel (anomalie mobile)	Fort ralentissement sur la voie concernée	TO en augmentation & NV en diminution	indéterminée
forçage d'un feu rouge	Retard au démarrage sur la perpendiculaire	Non comptage de véhicules en début de phase	courte

Tableau 4.1 : types d'incidents et leurs manifestations sur les signaux boucle

Dans le système mis en place par le TRRL* [Bretherton & al. 91] {Annexe C}, divers types d'incidents ont été étudiés. Ils sont caractérisés par les critères suivants :

- ❖ La durée de l'incident.
- ❖ Le nombre de chaînons affectés.
- ❖ Le degré d'obstruction, saturation, blocage des sorties. A chaque chaînon, on affecte un niveau maximal.
- ❖ L'intensité de l'anomalie estimée en prenant en compte les deux facteurs précédents (nombre de chaînons affectés et degré d'obstruction, saturation et blocage des

sorties).

La classification peut également se faire par des critères qualitatifs : incident sérieux, modéré ou mineur.

Giuliano [Giuliano 89] propose les critères suivants de classification :

- ❖ Le taux d'incident : causes, géométrie de la voirie, saturation, climat.
- ❖ Le type d'incidents : accidents, autres incidents.
- ❖ La durée de l'incident : dépend de la saturation.
- ❖ L'impact de l'incident sur la capacité : lieu de l'incident, impact dépendant de la nature de l'incident.

Les incidents se caractérisent par deux intervalles : la durée de l'incident lui-même et la durée de résorption de la saturation, une fois la cause de l'incident éliminée.

La longueur de file dépend du niveau de la demande au moment de l'incident, de la durée de celui-ci et du degré de réduction de la capacité. Plus longue est la file et plus il faudra de temps pour revenir à une situation de trafic normale.

A ce moment de notre exposé, il peut être intéressant de citer l'étude de Mason & al. [Mason & al. 92] sur les types de comportements de conducteurs pouvant induire une situation d'incident :

Cette étude propose une classification de différents types de comportements (IDB : Inappropriate Driving Behavior), le taux d'occurrence de chacun de ces comportements, le risque d'incident et de gravité de celui-ci induits par le comportement.

4.2 Défauts de capteurs

Un certain nombre de défauts-boucle influent directement sur les signaux transmis.

En fait, les différents défauts que nous pouvons rencontrer se traduisent : soit par le maintien trop long de la boucle à 0, soit par le maintien trop long de la boucle à 1.

Le premier cas se rencontre pour :

- ❖ une rupture boucle,
- ❖ un phénomène d'oubli magnétique,
- ❖ une erreur de transmission ou d'interface.

Le second cas se produit principalement dans le cas d'erreurs de transmission ou

d'interfaces (faux contacts).

4.3 Autres altérations des signaux des boucles

Il faut enfin tenir compte du comportement la plupart du temps imprévisible des usagers qui se traduit par certaines ruptures dans l'évolution des signaux. Ces ruptures peuvent être à tort interprétées comme étant des anomalies de trafic ou des défauts de capteurs. Ce type d'altérations peut être dû à une modification des pourcentages directionnels*.

4.4 Classification d'anomalies en fonction des signaux émis par les boucles magnétiques

Vues de la boucle magnétique, les caractéristiques d'anomalies qu'il semble possible d'isoler sont :

- La durée.
- L'expansion dans l'espace sur les boucles adjacentes et sur les boucles amont et aval.

Les anomalies décrites auparavant {§ 4.1} sont à regrouper dans les catégories suivantes :

- Les anomalies de longue durée (accident, stationnement illicite, déménagements, livraison, travaux) peuvent se propager et être à l'origine d'une saturation étendue.
- Les anomalies de courte durée (retard au démarrage, arrêt interdit, traversée des piétons, forçage d'un feu rouge) sont plus difficiles à mettre en évidence.
- Les anomalies volatiles (changement de files) sont pratiquement indécelables.

5. Conclusion

Nous avons vu dans quel contexte se posait le problème de la détection et de l'analyse d'anomalies de trafic urbain, quelques expérimentations effectuées dans le passé ainsi que les solutions envisagées par les collectivités locales pour résoudre ce problème. Nous avons également soulevé la difficulté de classer les anomalies étant donné le bruitage des mesures obtenues. Ce dernier est dû autant aux défauts des capteurs qu'à l'aspect aléatoire du comportement des usagers. Il paraît donc illusoire, pour la suite, d'avoir une classification très précise de ces situations. Tout au plus pourrons-nous dégager des grandes catégories.

Chapitre 3 - Capteurs

1. Introduction

Ce chapitre rappelle les types de capteurs que l'on peut rencontrer en régulation du trafic urbain. Dans la seconde partie, nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur la boucle magnétique, puisque c'est le seul capteur utilisé sur le site nancéien.

2. Différents types de capteurs

Les différents capteurs que l'on peut rencontrer dans le domaine du trafic urbain sont présentés ci-dessous.

Bibliographie générale sur les capteurs : [Tyburski 89] [Westbrook 89] [Cohen 90] [DRIVE V1056 MONICA 91]

- **Le traitement d'images** est en phase de développement car il devrait permettre d'obtenir beaucoup d'informations. Les inconvénients sont la lourdeur, la lenteur des traitements ainsi que le coût élevé, tout au moins à l'heure actuelle.

Bibliographie : [Blosseville & al. 90] [Blosseville & al. 91] [Bouzar & al. 90] [Briquet 90] [Cohen 90] [Espié & al. 90] [Inigo 89] [Jouannet & al. 91] [Munoz 81] [Robert & al. 90] [Young 89]

- **Les tubes pneumatiques** sont utilisés pour effectuer des comptages temporaires dans des études particulières.

Bibliographie : [Cohen 90] [Espié & al. 90]

- La **barrière laser** sert à étalonner les capteurs de vitesse.

Bibliographie : [Espié & al. 90]

- **Les boucles magnétiques** restent à l'heure actuelle le capteur le plus fiable et le plus simple à mettre en œuvre, bien que se pose déjà le problème de la détection des véhicules qui seront construits en matériaux indétectables, étant donné la recherche en cours dans les domaines des nouveaux matériaux. Ces capteurs sont, avec les détecteurs piézo-électriques, les seuls qui peuvent facilement faire du comptage différencié par voie. Selon leur forme et leur position {§ 3}, les boucles peuvent être mieux adaptées pour la détermination des comptages (petites boucles) ou la détermination des taux d'occupation

(grandes boucles).

Bibliographie : [Cohen 90] [Espié & al. 90] [SFIM 91] [SIEMENS 90] [Soeur 91]

- Les **capteurs piézo-électriques** : les armatures se chargent électriquement dès que ce capteur est soumis à une variation de pression. Il est utilisé pour le comptage des essieux, des véhicules par catégorie, les mesures de vitesses, la détection de surcharges et la classification des véhicules par type.

Bibliographie : [LPC 90 p.61] [Mansuy & al. 87]

- Les **détecteurs acoustiques à ultra sons** sont peu répandus en Europe et aux Etats-Unis mais majoritairement employés sur les autoroutes japonaises en raison de l'absence de génie civil.

Bibliographie : [Cohen 90] [Espié & al. 90]

- Les **radars à effet Doppler-Fizeau** sont quelquefois utilisés pour mesurer la vitesse (par exemple à Paris).

Bibliographie : [SFIM 90] [Stove 91] [Cohen 90]

- Des **détecteurs infra-rouges** ont été testés à Glasgow mais ne sont guère utilisés comme capteurs de trafic. Cependant, la technique infra-rouge est utilisée dans le dialogue entre les véhicules et les balises des systèmes de guidage. Ce type de détecteur est également utilisé pour la détection de traversées de piétons.

- Des **émetteurs-récepteurs à hyper-fréquences** sont utilisés lorsque l'on veut détecter certains types de véhicules (bus, véhicules de secours) dans le flot général de la circulation.

- Le **capteur sismique** a été utilisé pour détecter les vibrations lors des passages de véhicules.

Bibliographie : [Loffler & al. 90]

- D'autres méthodes de mesure telles que la technique des **véhicules flottants** et l'utilisation de la **photographie aérienne** peuvent être utilisées. La technique des véhicules flottants pourrait se développer dans le cadre d'une interaction système de régulation / système de guidage.

Bibliographie : [Cohen 90] [Kessaci & al. 90]

Bien que les types de capteurs utilisés en régulation de trafic urbain soient très variés, on peut noter que certains problèmes spécifiques tels que les cas de fonctionnement de nuit, dans le

brouillard ou sous la pluie posent des problèmes non encore résolus mais certains projets DRIVE s'intéressent à ces problèmes. L'implantation des capteurs a, ici comme dans d'autres domaines, autant d'importance que le choix du capteur lui-même. Dans le paragraphe suivant, nous présentons l'influence de l'implantation dans le cas d'une boucle magnétique.

L'avenir s'oriente également vers les capteurs intelligents, intégrant la fiabilité des informations et capables d'effectuer par eux-mêmes un certain nombre de calculs.

Bibliographie : [Gnaedinger & al. 92] [Sellam & al. 90] [SIEMENS 90]

3. Implantation des boucles magnétiques

La société SFIM, fabricant de matériel de trafic, détaille dans une brochure [SFIM 91] les types d'implantations de boucles selon le rôle qui leur est assigné : boucle de micro-régulation, boucle de limitation de vitesse et de sélection VL/PL ou boucle destinée à l'analyse de trafic :

- Boucle de micro-régulation :

l'objectif est de détecter de manière quasi-certaine le passage d'un véhicule puisque cela va servir, par exemple, à permettre la mise au vert d'une voie secondaire. Ces boucles sont implantées à 5 mètres environ en amont des feux pour des boucles d'appel et 10 mètres pour des boucles de prolongation (voir schéma ci-contre).

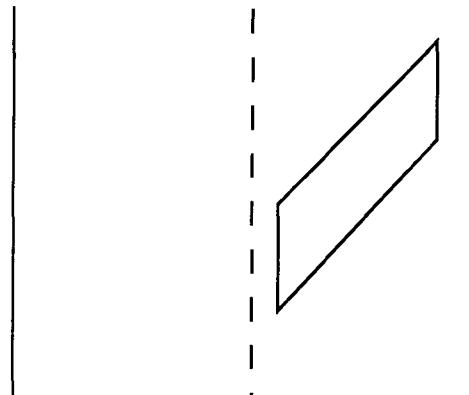


Figure 3.a : boucle de micro-régulation

- Boucle de limitation de vitesse et sélection VL/PL : il s'agit de deux boucles situées à une distance telle que l'espacement entre les deux boucles soit égal au seuil de longueur fixé pour les véhicules lourds (de l'ordre de 3 mètres) pour la sélection VL/PL. Dans le cas d'une détermination de la vitesse, il suffit que les boucles ne soient pas trop éloignées l'une de l'autre.

- Boucles d'analyse de trafic : ce sont des boucles qui servent, en général, à déterminer les comptages et taux d'occupation. Elles sont placées perpendiculairement au sens de déplacement du trafic. Les boucles "longues" ou "courtes" privilégiuent le comptage ou au contraire la détermination du taux d'occupation (cf. le tableau ci-dessous).

	<i>Taux d'occupation</i>	<i>Comptages</i>
<i>Boucle "longue"</i>	Bonne car tout véhicule est détecté.	Mauvaise car deux véhicules se suivant de près ne sont pas différenciés.
<i>Boucle "courte"</i>	Mauvaise car l'occupation est nulle si deux véhicules marquent un grand espace entre eux à l'arrêt.	Bonne car sépare bien tous les véhicules.

Tableau 3 : Caractéristiques des boucles longues ou courtes

Lorsqu'une chaussée a plusieurs voies en parallèle, il est nécessaire de bien séparer les véhicules sur les voies. Lorsqu'une seule boucle par voie est posée, il arrive qu'un véhicule soit compté sur les deux voies à la fois. Pour résoudre ce problème, certaines villes (Reims, Paris ...) placent leur boucles comme ci-dessous : ceci permet de ne compter chaque véhicule qu'une seule fois.

Un véhicule sera compté sur la file de droite si les boucles A et B sont activées, sur la file du milieu si B et C sont activées et deux véhicules sont comptés si A, B et C sont activées.

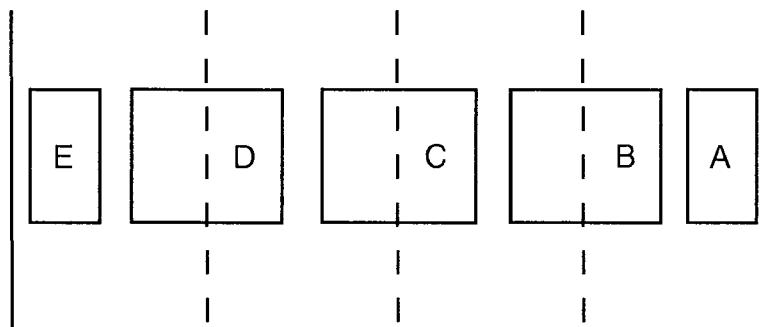


Figure 3.b : Implantation des boucles magnétiques

Les boucles magnétiques utilisées par le système de régulation nancéien sont plutôt des boucles de taux d'occupation puisqu'elles sont "longues" dans le sens de déplacement des véhicules.

Pour conclure, il faut garder présent à l'esprit que les boucles magnétiques sont des capteurs ponctuels. Cela veut dire qu'elles ne "voient" que ce qui se passe en un point. Elles ne peuvent, par conséquent, jamais être comparées à une caméra qui analyse une zone entière avec une bonne résolution. Pour que la boucle soit comparable, il faudrait une infinité de boucles infinitésimales (jauges de contrainte ...) directement dans la chaussée. Ceci est une vue de l'esprit puisqu'un tel principe serait difficile à gérer, en plus des problèmes de dilatation de la chaussée dus aux contraintes mécaniques et thermiques.

4. Capteurs futurs en régulation du trafic urbain

Nous pouvons envisager {chap.1 §4.5} que, dans le futur, le système de régulation de trafic urbain et le système de guidage seront connectés et qu'ils échangeront par conséquent des informations entre eux et avec les véhicules qui circulent. Il n'y aura plus à proprement parler à ce moment de capteurs de trafic, avec la définition actuelle. Les véhicules seront localisés par le système de guidage à l'aide de balises de transmission infra-rouges, de codeurs incrémentaux ou de satellites [Kessaci & al. 90] [Laurent 90]. Le système de régulation pourrait consulter une base de données dynamique commune avec le système de guidage et localisation. Cette base comprendrait :

- * la situation de chaque véhicule à chaque instant pour obtenir une image très fine des flux présents,
- * les itinéraires prévus pour les usagers sur la voirie pour anticiper la meilleure stratégie en fonction des prévisions des itinéraires.

Naturellement nous n'en sommes pas encore là. Dans les paragraphes suivants, nous allons voir quelle pourrait être l'évolution de l'instrumentation du trafic à court ou moyen terme.

4.1 Types de capteurs

- ☞ **Les capteurs traditionnels** : principalement les boucles magnétiques. Ces capteurs devraient exister tant que les véhicules restent détectables (construits en matériaux ferromagnétiques) et tant que tous les véhicules ne sont pas tous interfacés avec un système de guidage.
- ☞ **Les caméras** : promises à un brillant avenir lorsque les algorithmes seront performants et rapides et dès que seront résolus les problèmes de reconnaissance de forme y compris en situation dégradée (nuit, brouillard) et le coût. La caméra sera un capteur intéressant si tous les véhicules ne sont pas pris en compte par le système de guidage. Elle permet également de valider des informations à certains endroits stratégiques.

Pour réussir, une stratégie a besoin d'une instrumentation et d'un réseau de transmission corrects et fiables [Gnaedinger 91]. Nous allons voir dans le paragraphe suivant comment nous pouvons envisager l'évolution de la boucle magnétique.

4.2 Une boucle magnétique améliorée ?

Certains constructeurs sont en train de se pencher sur les possibilités de rendre une boucle intelligente.

Siemens propose de placer [SIEMENS 90] deux boucles l'une derrière l'autre, ce qui permet de déterminer :

- * Le nombre de véhicules et le taux d'occupation : le fait d'avoir deux boucles courtes l'une derrière l'autre présente d'une part l'avantage d'extraire une bonne détermination du comptage puisque chaque boucle est courte. D'autre part, on obtient une bonne détermination du taux d'occupation puisqu'en travaillant sur la surface comprise entre chaque boucle et entre la fin de la première et le début de la seconde, cela revient à une boucle "longue".
- * La mesure de la vitesse par mesure du temps nécessaire pour parcourir la distance entre les deux boucles.
- * La différenciation du type de véhicules.
- * La détection du sens de marche par émission d'un signal lorsque le véhicule traverse les deux boucles dans le sens A-B et aucun signal n'est déclenché dans le sens contraire B-A.

En plaçant les boucles comme décrit ci-dessus et à cheval sur les voies comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, nous devrions obtenir un capteur qui nous donne une information assez fiable. En outre, le fait d'avoir deux boucles à la file permet la validation de l'information reçue. Naturellement, installer plus de boucles entraîne un investissement substantiel mais peut s'envisager pour des zones sensibles.

4.3 Un carrefour intelligent

l'INRETS* travaille dans le cadre du projet DRIVE INVAID sur un projet de carrefour intelligent [Sellam & al. 90]. Ce dernier vise à intégrer les fonctions de surveillance, de contrôle, de communication et de prise en charge des capteurs. Cette étude est basée sur le traitement d'images vidéo.

La fonction de surveillance a pour buts la détermination du régime de fonctionnement du carrefour à chaque instant et la détection de tout dysfonctionnement dû à un événement incidentel ou accidentel. Pour réaliser ces fonctionnalités, un mécanisme d'inférence utilise les connaissances suivantes :

- * les considérations topologiques et fonctionnelles des objets impliqués ainsi que leurs inter-

relations,

- * les couleurs des feux et temps écoulé depuis la dernière modification de chaque feu,
- * les mesures de trafic disponibles pour chaque zone concernée,
- * les indices et seuils de fonctionnement caractéristiques de chaque zone à chaque régime connu.

La fonction de contrôle est en cours de spécification. Quatre idées sont avancées concernant cette fonctionnalité :

- * l'aspect modulaire,
- * l'étude des différentes méthodes de contrôle existantes,
- * l'exploration d'autres techniques apparentées au contrôle réparti : les auteurs mentionnent le contrôle hiérarchique et les réseaux neuronaux,
- * la mise au point d'une simulation du fonctionnement du carrefour suffisamment fine pour être utilisée par différentes méthodes de régulation.

Comme nous pouvons le voir, l'idée de carrefour intelligent fait son chemin mais beaucoup de travail reste à faire.

5. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que divers types de capteurs sont utilisés en régulation du trafic urbain mais que seuls certains d'entre eux et en particulier la boucle magnétique et le traitement d'images peuvent nous permettre d'avoir des informations différencierées sur les différentes voies. De plus ces capteurs nous offrent la possibilité d'extraire deux paramètres : le nombre de véhicules et le taux d'occupation.

Le traitement d'images n'a pas été approfondi car notre cahier des charges {voir annexe D} spécifiait de ne tenir compte que de l'existant à Nancy. Il va de soi que cette technique nous aurait permis de déterminer d'autres paramètres mais avec un investissement financier plus élevé.

Après avoir recensé les capteurs et analysé la prospective dans ce domaine, nous verrons dans le chapitre suivant quels paramètres nous allons pouvoir dégager en vue de la modélisation du trafic.

Chapitre 4 - Problématique

1. Introduction

Le présent chapitre pose les premiers jalons pouvant nous mener à la modélisation du trafic sur un carrefour. Nous proposons une étude bibliographique succincte sur la modélisation du trafic urbain. Nous présentons ensuite deux études développées antérieurement à Nancy : un système de détection d'anomalies et un modèle d'analyse de trafic. Nous analysons le carrefour 38, un carrefour-clef de Nancy qui servira de zone-test et déterminons les pourcentages directionnels* par filtrage de Kalman. Les différents paramètres qui peuvent être utilisés pour analyser les signaux émis par les boucles magnétiques sont enfin explicités.

2. Modélisation

La plupart des théories développées en matière de régulation de trafic sont des théories qui cherchent à minimiser les coûts (consommation des véhicules, temps de parcours, nombre d'arrêts, retard pris par un véhicule, bruit, pollution, ...). Ces théories s'appuient presque toujours sur la matrice origine-destination (OD), donnée essentielle pour la planification des transports. La matrice OD contient les principales entrées et sorties de la ville ainsi que les principaux itinéraires à l'intérieur de la ville. On peut déterminer ou mettre à jour une matrice O-D par une enquête ménage qui consiste à interroger des usagers sur la route ou chez eux pour connaître les déplacements qu'ils effectuent quotidiennement. Les paramètres intéressants de ce point de vue sont l'origine, la destination, l'itinéraire emprunté et le moment de la journée où le trajet est effectué.

Deux approches coexistent dans la modélisation du trafic :

- L'approche **macroscopique** où les variables sont le volume du trafic, la vitesse moyenne, la concentration (liée au taux d'occupation).
- L'approche **microscopique** qui considère chaque véhicule en particulier. Dans ce cas les variables sont l'espace avec la voiture précédente, la vitesse de la voiture considérée [Cohen 90]...

Les modèles sont en général classés en modèles statiques et dynamiques [Toint 91]. Les premiers, *modèles statiques*, se proposent de décrire le trafic sur une période suffisamment longue pour permettre à tous les usagers qui entament un trajet pendant cette période d'atteindre leur destination avant la fin de la période : par exemple une journée. Nous obtenons une

simplification considérable puisqu'il suffit de retenir la valeur cumulée sur la période et non plus d'analyser le trafic à différents endroits et différents moments. Cette simplification peut être suffisante pour certains types d'analyses (étude de l'usure des revêtements, par exemple). L'expérimentation effectuée dans le cadre du projet RESCU* à Nancy et explicitée dans le présent chapitre {§ 3.2} entre dans ce cadre.

Les *modèles dynamiques* introduisent explicitement l'écoulement du temps ; ces modèles sont nécessaires pour décrire l'évolution temporelle du trafic telle que la congestion, les choix d'itinéraires et les déplacements des divers modes de transport. Les modèles dynamiques sont moins utilisés car difficiles à mettre en œuvre, à valider et il est plus difficile de collecter les données nécessaires [Toint 91].

Après avoir décrit le réseau, l'étape suivante consiste à décrire le trafic lui-même. La première étape est la *génération*. Cette étape utilise les techniques statistiques pour prédire le nombre de trajets émis par une zone et ceux aboutissant à cette zone (émissivité et attractivité de la zone). Puis vient l'étape de *distribution* qui détermine la répartition des trajets par couple (matrice OD). L'outil classique est ici le modèle *gravitaire*, inspiré de la loi de la gravitation, proposé en 1955 [Casey 55] et qui postule que le nombre de déplacements entre deux zones varie approximativement comme une fonction de l'inverse du coût du trajet [Hallefjord & al. 86] [Sikobar & al. 81] [Tamin & al. 90] [Wills 86].

Il faut ensuite effectuer un *choix modal* c'est-à-dire établir pour chaque couple OD la proportion des trajets de chaque mode (voitures particulières, transports en commun).

Et enfin vient l'étape d'*assignation* qui détermine parmi tous les itinéraires possibles pour chaque couple OD ceux qui sont effectivement utilisés pour chacun des modes, nous en déduisons la charge du réseau pour la période considérée. Le critère utilisé peut être [Toint 91] :

- l'itinéraire le plus court, peu réaliste,
- l'ensemble des chemins "raisonnables",

- l'équilibre de trafic de Wardrop : "les coûts de parcours pour tous les itinéraires réellement utilisés dans le réseau sont plus faibles ou égaux à ceux qui seraient encourus par un véhicule unique empruntant un itinéraire non utilisé". Aucun utilisateur ne peut donc, dans une situation d'équilibre, réduire son coût de déplacement par une décision unilatérale. Tous les itinéraires entre une origine et une destination données ont le même coût. Ce concept est beaucoup plus complexe car il fait intervenir, dans le choix d'un itinéraire entre deux quartiers, non seulement les trajets qui lient les deux quartiers mais aussi la charge du réseau qui résulte de tous les autres trajets entre tous les autres couples OD. Nous parlerons dans ce cas d'*équilibre descriptif* car le critère utilisé y est le coût de déplacement pour chaque utilisateur

considéré individuellement. Nous pouvons aussi considérer l'*équilibre normatif* qui consiste à répartir le trafic de façon à minimiser le coût total pour l'ensemble des usagers ou la société dans son ensemble. L'équilibre descriptif est utilisé pour prédire le comportement des usagers tandis que l'équilibre normatif est parfois calculé pour fournir l'image d'une situation idéale.

Les quatre étapes décrites précédemment (génération, distribution, choix modal, assignation), *successives* dans la théorie, sont le plus souvent dans la pratique, intégrées et interdépendantes.

Bibliographie : [Daganzo 85] [Evans 76] [Florian & al. 75] [Gartner 80] [Jörsten 80] [Le Blanc & al. 75] [Smith 84] [Vythoulkas 90].

Willumsen propose quelques modèles simples de transport basés sur les comptages [Willumsen 81]. L'auteur souligne l'intérêt d'utiliser les comptages pour estimer les matrices O-D¹³. Etant donné que plusieurs matrices peuvent reproduire les mêmes comptages, il faut ajouter des contraintes pour résoudre le problème.

Trois approches sont proposées :

- * le modèle de gravité dont les paramètres sont calibrés à partir des comptages,
- * la technique de programmation mathématique associée à un problème d'assignation de l'équilibre pour estimer les matrices de déplacement en zone saturée,
- * la théorie de l'information et entropie pour estimer la matrice de déplacement la plus consistante avec les flux observés.

Problème d'estimation : Soit une zone d'étude comprenant N points générateurs et attracteurs de déplacements, le réseau routier peut être défini par M noeuds et L chaînons^{*} liant chacun une paire de noeuds.

P_{ij}^{lm} est la proportion des déplacements allant de l'origine i à la destination j en empruntant le chaînon lm, T_{ij} le nombre de déplacements de i à j, V_{lm} le flux sur le chaînon lm.

L'équation fondamentale d'estimation de la matrice de déplacements est : $V_{lm} = \sum_i \sum_j P_{ij}^{lm} T_{ij}$.

Modèles de gravité : le modèle de Robillard [Robillard 75] s'exprime par $T_{ij} = R_i S_j f(c_{ij})$ où $f(c_{ij})$ est une "deterrence function" du type $f(c_{ij}) = c_{ij}^{-d}$, R_i et S_j sont les paramètres de génération et d'attraction des déplacements. Il faut ensuite calibrer R_i , S_j et d pour minimiser le carré des écarts entre trafic observé et trafic prédict. Il s'agit d'un modèle de régression non linéaire.

Les modèles de gravité conventionnels s'expriment sous la forme $T_{ij} = b_1 O_i D_j c_{ij}^{-d}$. O_i et D_j représentent l'information relative à la population, l'emploi, aux points d'origine et de destination, c_{ij} est le coût du voyage entre i et j, b_1 et d sont les paramètres pour la calibration.

¹³Origine-Destination

Bibliographie : [Tamin & al. 90] [Wills 86] [Sikobar & al. 81] [Hallefjord & al. 86]

Approche par assignation équilibrée : cette méthode permet d'intégrer la saturation. L'approche la plus connue est celle de Nguyen [Nguyen 82]. Il s'agit de minimiser :

$$\text{Min } F(V_{lm}, T_{ij}) = \sum_{lm} \int c_{lm}(x) dx - \sum_{ij} \hat{c}_{ij} T_{ij}$$

sous les contraintes : $T_{ij} - \sum_r T_{ij}^r = 0$ pour tout i, j ;
 $T_{ij}^r \geq 0$ pour tout i, j ou r ;
 $T_{ij} \geq 0$ pour tout i, j ;
 $V_{lm} = \sum_{ij} T_{ij}^r \delta_{ij}^{lm}$ pour tous les nœuds.

où c_{lm} est la relation coût-flux pour le chaînon lm , \hat{c}_{ij} le coût observé du voyage entre i et j , T_{ij}^r le nombre de trajets entre i et j via l'itinéraire r et δ_{ij}^{lm} vaut 1 si l'itinéraire r entre i et j utilise le chaînon lm et 0 dans le cas contraire.

Bibliographie : [Daganzo 85] [Le Blanc & al. 75] [Smith 84] [Vythoulkas 90].

Maximisation d'entropie et minimisation d'information : l'entropie à maximiser s'exprime par :

$$\text{Max } (S(T_{ij})) = - \sum_{ij} (T_{ij} \log_e T_{ij} - T_{ij})$$

respectant la contrainte :

$$V_{lm} - \sum_{ij} T_{ij} P_{ij}^{lm} = 0 \text{ et } T_{ij} \geq 0.$$

En utilisant la méthode des lagrangiens, nous aboutissons à la solution formelle $T_{ij} = \prod_{lm} X_{lm}^{p_{ij}^{lm}}$

où $X_{lm} = e^{-\lambda_{lm}}$ et λ_{lm} est le multiplicateur de Lagrange associé au comptage sur le chaînon lm .

La minimisation d'information est utile lorsque nous voulons mettre à jour une matrice O-D qui existe déjà. La forme mathématique est la suivante : $T_{ij} = t_{ij} \prod_{lm} X_{lm}^{p_{ij}^{lm}/g_{ij}}$ où $g_{ij} = \sum_{lm} p_{ij}^{lm}$.

Bibliographie : [Danech-Pajouh 86] [Farges & al. 77] [Jörsten 80]

Les modèles de gravité sont faciles à mettre en œuvre sur le plan informatique, les méthodes d'assignation équilibrée sont souhaitables pour les petites zones urbaines saturées et les modèles de maximisation d'entropie sont utilisés pour la mise à jour des informations.

Modèles chaotiques

Ce type de modèles n'a pas à notre connaissance été véritablement testé dans le cadre de la régulation du trafic urbain, mis à part peut-être par Jumarié [Jumarié 82]. Nous allons en parler puisque nous pensons qu'un modèle chaotique pourrait fort bien être utilisé dans le domaine qui

nous intéresse et plus particulièrement pour le traitement de la saturation. Le premier sous-paragraphe va rappeler succinctement le principe de fonctionnement de modèles chaotiques. Dans le second nous verrons comment utiliser ces modèles pour le traitement de la saturation.

Principes

Nous savons depuis longtemps qu'un certain nombre de phénomènes, particulièrement les phénomènes naturels, ne sont pas modélisables classiquement. Sans entrer dans les grands débats philosophiques à l'origine de ces théories, pour savoir s'il est possible ou non de tout connaître sur le monde qui nous entoure [Thuiller 91], nous pouvons considérer que ces phénomènes ne sont pas prévisibles (ex : météo) parce que nous ne connaissons pas toutes les variables en présence avec suffisamment de précision.

Nous pouvons illustrer le phénomène par les deux exemples ci-dessous :

- ➊ Le cas de la goutte d'eau [Nicolis 91]. Il s'agit d'étudier le cas d'une goutte d'eau, considérée comme indivisible qui tombe du ciel juste au sommet d'une montagne. Il est impossible de prédire si cette goutte d'eau va prendre de chemin de l'adret ou celui de l'ubac. Selon le cas, son avenir va pouvoir être aussi différent que se retrouver en Méditerranée à Fos sur mer ou près de Rotterdam en mer du Nord et tout cela pour une très faible brise juste avant que la goutte n'atteigne le sol. Pour prédire son devenir, il est nécessaire dans ce cas de connaître son passé et particulièrement de pouvoir mesurer avec une très grande précision la très faible brise qui aura des conséquences aussi importantes.
- ➋ Le cas de la percolation [Grassberger 91]. Ce cas peut être illustré par un exemple simple. Prenons un damier très grand (de l'ordre de 60 cases de côté) et remplissons-le aléatoirement avec des cases bleues et rouges, les deux couleurs étant équiprobables, nous observerons des amas rouges ou bleus plus ou moins irréguliers mais aucun ne s'étendra d'un bout à l'autre du damier. Pour avoir un amas qui s'étende d'un bout à l'autre du damier, la théorie dit qu'il faut une proportion d'une couleur d'au moins 59,27 %. Ce qui est extraordinaire, c'est que la probabilité d'avoir un amas qui traverse le damier est quasiment nulle si la proportion est inférieure à 59,27 % alors que cette probabilité tend vers un dès que l'on dépasse cette proportion.

Pour prédire la trajectoire d'une boule de billard, le devenir de la goutte d'eau ou la probabilité qu'il y ait percolation, il nous faut connaître simplement mais avec une grande précision les conditions initiales. Toute erreur, aussi infime soit-elle, dans la mesure de ces conditions initiales, aura des conséquences catastrophiques sans commune mesure ni avec l'erreur de mesure ni avec la valeur de la mesure elle-même.

Ce genre de modèle permet de représenter des phénomènes tels que les remous dans un fluide, le mouvement des particules dans un gaz, le mouvement des planètes [Laskar & al. 91], le

mouvement des essaims de criquets et même les désordres boursiers [Orléan 91] ou psychologiques [Bergeret 91].

Modèles chaotiques pour le traitement de la saturation

Un modèle chaotique peut-il être utilisé pour caractériser l'apparition de la saturation ? En effet, ce qui nous intéresse c'est le moment où le trafic passe de l'état de fluidité à l'état de saturation et le passage d'un état à l'autre peut quelquefois n'être causé que par une voiture qui traîne un peu au démarrage, de la même façon que notre goutte d'eau qui part vers l'adret ou vers l'ubac, simplement pour une toute petite brise au moment opportun.

L'aspect de la propagation de la saturation sur une zone pourrait être modélisée à partir de la théorie de la percolation.

3. Expériences antérieurement menées à Nancy

3.1 Etude statistique des courbes provenant du système de détection d'anomalies de Nancy

3.1.1 Système de détection d'anomalies du poste central de la circulation

Ce système a été mis en place au poste central de la circulation à Nancy dans le cadre d'un projet CNAM [Jouannet 89] {Annexe A §2.3}. Nous rappelons qu'il s'agit d'un système permettant d'orienter automatiquement les caméras en fonction de la détection d'anomalies de trafic.

Pour les deux carrefours équipés, le carrefour 19 et le carrefour 38 (voir schéma du carrefour 38 {Annexe B}), la détection s'effectue par la mesure du taux d'occupation et du nombre de véhicules pendant le temps de vert ; cette mesure nous donne un point dans le diagramme TO/NV*. L'anomalie est détectée en fonction de la situation du point considéré dans ce diagramme. La détection s'effectue de deux manières :

- si le pourcentage de taux d'occupation dépasse un certain seuil (seuil de validation - zone critique), c'est l'erreur TO,
- si le point sort des plages indiquées sur les schémas ci-dessous, il s'agit d'une erreur modèle.

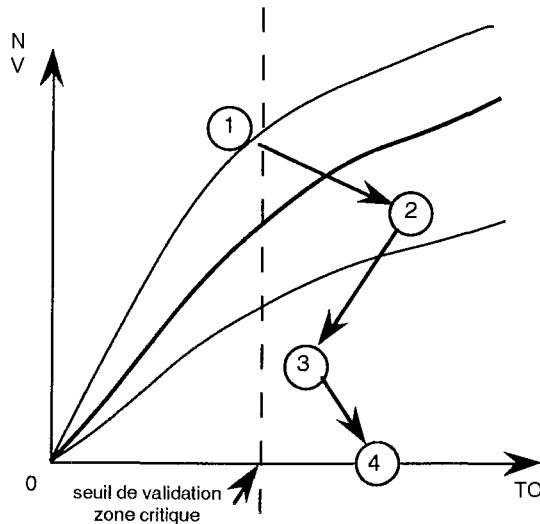


Figure 3.3.1.a : saturation brutale

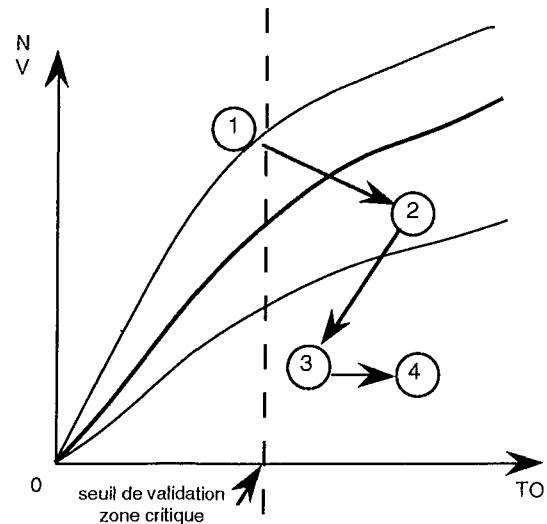


Figure 3.3.1.b : formation de ralentissements

A chaque boucle magnétique correspond un modèle TO/NV de la forme $NV = a.(TO)^b$ qui peut évoluer dans le temps. Autour de la courbe de ce modèle est définie une plage qui correspond à l'intervalle de confiance du détecteur, dans laquelle le trafic peut être considéré comme étant fluide. En dessous de cette plage, nous sommes en état d'anomalies. Etre trop au-dessus de cette plage n'a guère de sens puisque cela signifierait que beaucoup de véhicules passeraient (NV grand) alors que la boucle ne serait presque pas occupée.

Nous pouvons voir sur les schémas précédents que la séquence d'évolution du couple TO-NV est différente dans le cas de ralentissements et dans le cas d'une apparition brutale d'un état de saturation.

3.1.2 Dépouillement des fichiers créés par le système de détection

3.1.2.1 Fichiers anomalies

Dans le présent paragraphe, nous allons voir le type d'informations que l'on a pu extraire des fichiers anomalies. Ce fichier contient la date et l'heure, le numéro de détecteur et le nom de la rue qui sont à l'origine de l'incident, le type d'incident, les valeurs du taux d'occupation et du nombre de véhicules à ce moment.

Les données exploitées sur les quatre courbes suivantes ont été acquises entre le jeudi 8 mars 1990 et le mercredi 20 juin 1990. 414 incidents ont été détectés durant cette période.

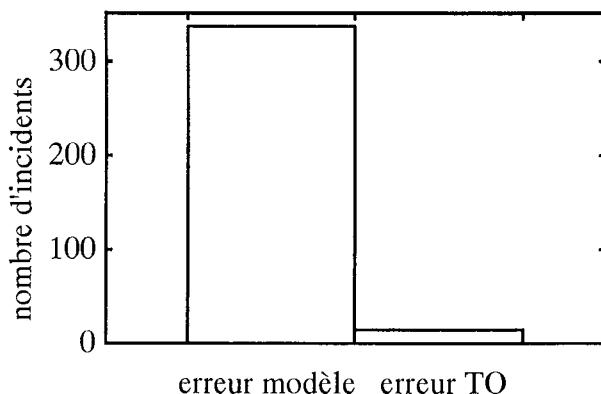


Figure 3.1.2.1.a : Répartition des erreurs par type sur le carrefour 38

Cette courbe nous montre que le type d'erreurs le plus fréquemment rencontré est la sortie de la plage de fonctionnement définie dans l'intervalle de confiance du modèle. Elle a été appelée par l'auteur l'**erreur modèle**.

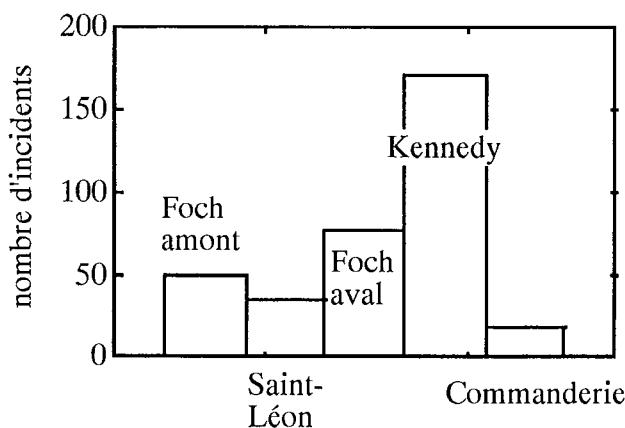


Figure 3.1.2.1.b : Répartition des erreurs par rue sur le carrefour 38

Sur ce schéma nous pouvons voir la répartition des causes d'incidents par rue. Le viaduc Kennedy (voir schéma du carrefour 38 {Annexe B}) est très largement la cause de la majeure partie des détections. Ce graphique illustre la répartition des défauts dans l'**espace**.

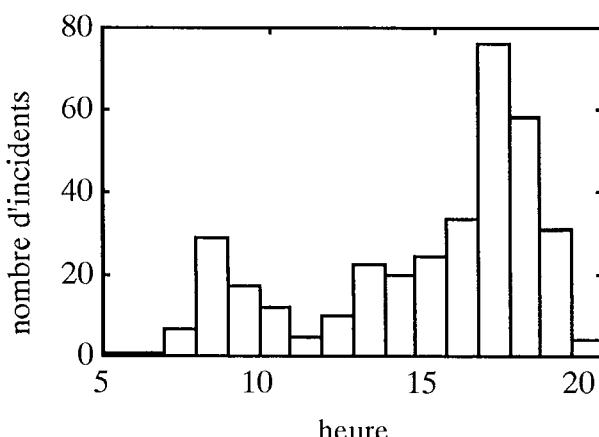
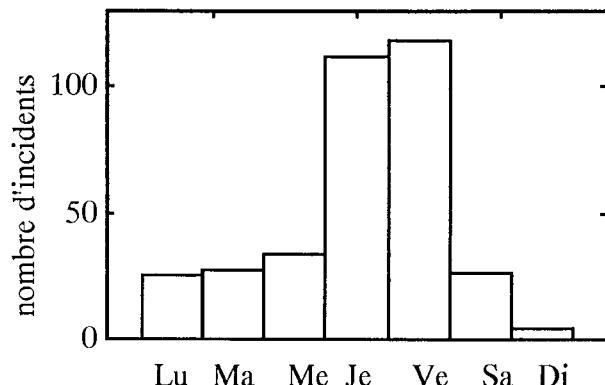


Figure 3.1.2.1.c : Répartition des incidents en fonction de l'heure sur le carrefour 38

Cet histogramme montre la répartition des incidents en fonction du **temps**. Nous voyons que la majeure partie d'entre eux est détectée pendant l'heure de pointe du soir entre 17 et 19 heures principalement. Les autres heures de pointe sont moins marquées. Nous pouvons considérer qu'à 17 heures les anomalies enregistrées sont du type anomalies **chroniques** tandis que les défauts détectés à 20 heures sont dus à des anomalies **accidentelles**.



Certains jours de la semaine sont plus chargés et sont la cause de plus d'incidents, c'est le cas des jeudis et vendredis. Cette constatation n'est pas aisée à expliquer, surtout dans le cas du jeudi.

Figure 3.1.2.1.d : Répartition des incidents en fonction des jours de la semaine sur le C 38

3.1.2.2 Fichiers journaliers

Nous pouvons à partir de ces fichiers extraire l'évolution des temps de vert et des temps de cycle, la date et l'heure de chaque début et fin de cycle, ainsi que les valeurs du taux d'occupation et du nombre de véhicules sur l'ensemble des boucles qui entourent chacun des deux carrefours 19 et 38. A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous la courbe TO/NV relative à la boucle 45 en date du 16 avril 1990.

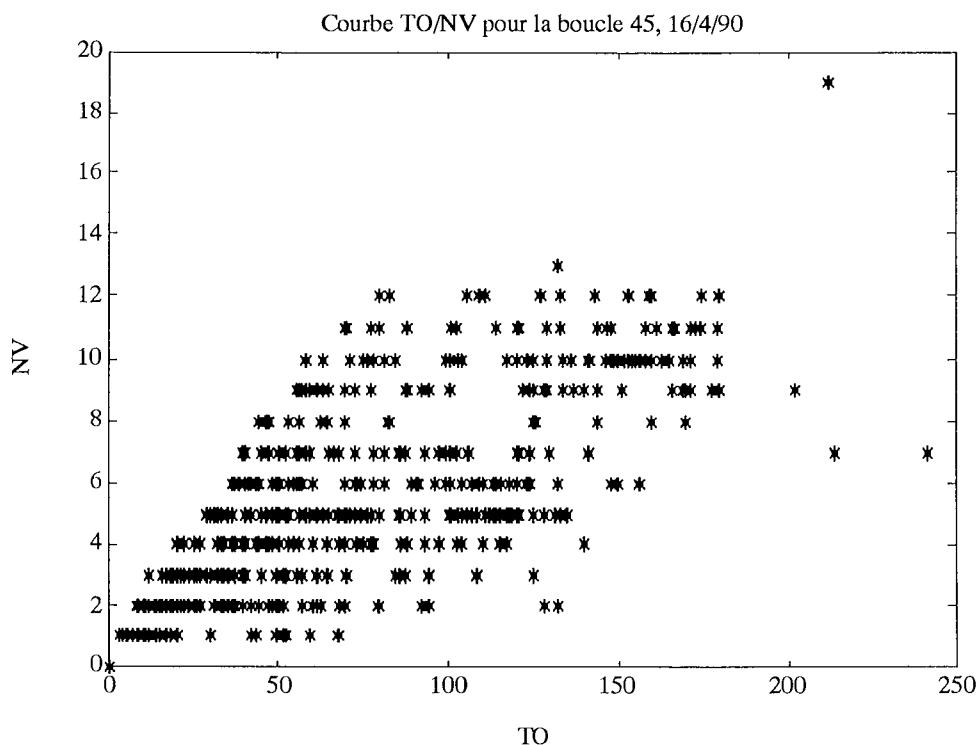


Figure 3.1.2.2 : Nombre de véhicules en fonction du taux d'occupation

Les données obtenues sur le système installé au poste central de la circulation nous

permettent de détecter une anomalie mais ne nous permettent ni une caractérisation de l'évolution du risque d'anomalie ni une classification dans le temps et dans l'espace de cette anomalie lorsque celle-ci est apparue.

3.2 RESCU - modèle d'analyse de trafic

Il s'agit d'un modèle d'analyse de trafic élaboré dans le cadre d'un DEA (diplôme d'études approfondies) en 1991 [Roth 91] en collaboration avec la Ville de Nancy. Ce modèle RESCU (Régulation Entrées-Sorties en Contexte Urbain) est basé sur le principe de décomposition de la ville ou de l'agglomération en secteurs, eux-mêmes pouvant être à leur tour décomposés en sous-secteurs puis, au niveau le plus bas, en chaînons et carrefours.

L'objectif de cette décomposition hiérarchisée est d'étudier chacune de ces composantes en vue de définir des **indicateurs d'encombres statiques** et **dynamiques**. Ces deux indicateurs sont censés être significatifs des possibilités d'absorption de véhicules d'un quartier, ils doivent permettre de comparer entre eux différents quartiers, voire être utilisés dans le cadre de la régulation ou du guidage dynamique pour connaître à chaque instant les possibilités d'absorption encore disponibles. Le projet de DEA a porté sur la zone de la ZAC de la Croix de Bourgogne qui est une zone où cohabitent un secteur de fort appel de stationnement et un secteur de "transit" (les quatre grands axes de circulation autour de la ZAC).

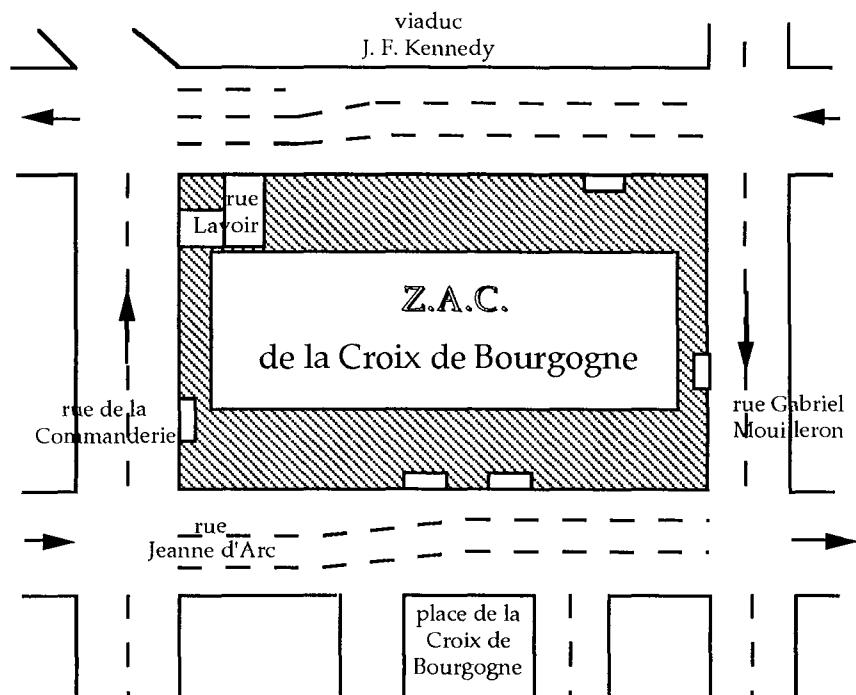
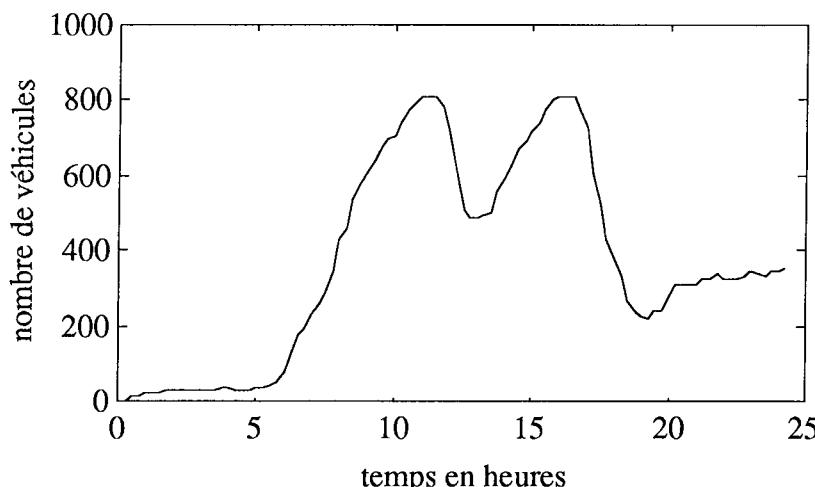


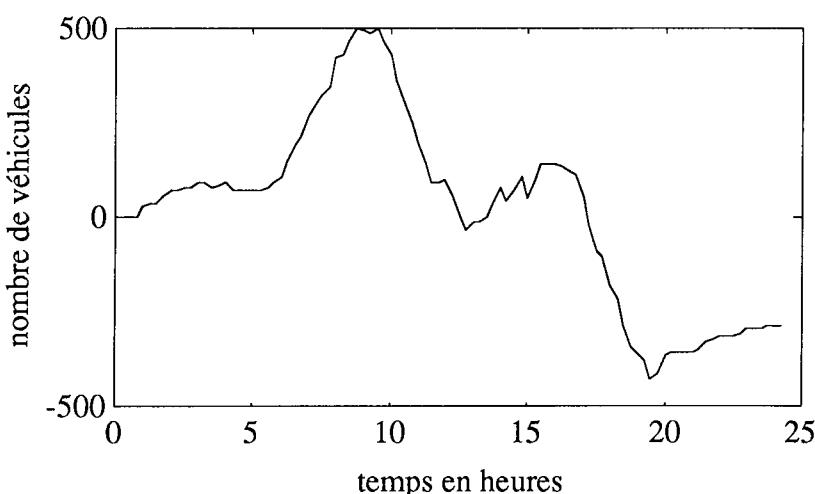
Figure 3.2.a : ZAC de la croix de Bourgogne

Les courbes suivantes illustrent l'intégration des résidus entre les véhicules entrants et sortants sur la ZAC proprement dite et sur la zone totale regroupant la ZAC et les quatre axes de transit : le viaduc Kennedy, la rue de la Commanderie, la rue Gabriel Mouilleron et la rue Jeanne d'Arc. Ces données concernent le jeudi 21 mars 1991 et ont été obtenues par comptage pneumatique.



5329 véhicules ont été comptabilisés sur la ZAC ce jour-là.
Le résidu final représente 6,8 % des flux totaux.

Figure 3.2.b : Intégration des résidus sur la ZAC



69470 véhicules ont été comptabilisés sur la zone ce jour-là.
Le résidu final représente 0,42 % des flux totaux.

Figure 3.2.c : Intégration des résidus sur la zone

La partie stationnement, autrement dit les flux sur la ZAC proprement dite, est visible sur les courbes représentants les flux sur la zone ZAC + Transit, bien que ces flux ne représentent que moins de 10 % du total. C'est là un résultat intéressant puisque cela nous permet, le cas échéant, de "déconvoluer" les parties stationnement et transit sur une zone pour laquelle les deux parties ne pourraient être étudiées séparément. Nous pouvons apercevoir deux maxima. Les montées vers le sommet de chacune des deux bosses correspondent au remplissage de la sous-zone de stationnement (ZAC proprement dite dans notre cas), tandis que les décroissances correspondent aux moments où plusieurs véhicules quittent la sous-zone.

Pour ce qui nous intéresse dans le cadre de ce mémoire, cette étude a permis de mettre en évidence de manière concrète les insuffisances des capteurs utilisés pour mesurer les flux sur cette zone, il s'agissait en l'occurrence des compteurs pneumatiques. Il a fallu, étant donné que près de 30 % des véhicules sur la zone de stationnement de la ZAC étaient perdus quotidiennement, effectuer des comptages manuels et nous nous sommes aperçus que les compteurs pneumatiques pouvaient dans certains cas atteindre 50 % d'erreur.

En ce qui concerne la modélisation tentée au niveau de la zone, celle-ci n'a pu être sophistiquée dans la mesure où la période d'échantillonnage imposée par la technologie des compteurs pneumatiques était du quart d'heure. Ceci étant bien trop peu précis pour utiliser des modèles dynamiques, des modèles statiques et déterministes ont donc été utilisés. Nous pouvons penser qu'une grande période d'échantillonnage nous suffit pour étudier le comportement en terme de stationnement puisque celui-ci s'étend sur une période longue ; par contre les informations sont insuffisantes pour l'étude des véhicules en mouvement. Par conséquent et pour ce qui nous concerne, nous préconisons l'usage de modèles dynamiques qui peuvent évoluer et de ce fait tenir compte des différents types de trafics. Des périodes d'échantillonnage courtes devraient nous permettre d'y parvenir.

4. Analyse du carrefour 38

Dans le présent paragraphe nous allons proposer une analyse des différents comportements du trafic sur le carrefour 38 qui nous a servi de zone-test. Un schéma de ce carrefour est proposé dans le mémoire {Annexe B}.

4.1 Topologie et renvois de vert

Le tableau suivant nous présente chacune des boucles, la situe dans son environnement et précise les périodes où elle est utile.

Numéros de boucles	Carrefour	Passages des véhicules
35, 36, 37	24 (entre C38 ¹⁴ et C24)	RV1 _{C24} = 1
45, 46, 47, 48	38 (entrées)	RV1 _{C38} = 1
49, 50, 51, 52	38 (entrées)	RV2 _{C38} = 1
137, 138	38 (sorties)	RV2 _{C38} = 1
9	38	sans arrêt

Tableau 4.1 : Etats des feux lors du passage de véhicules sur les boucles

¹⁴C38 : carrefour 38 ; C24 : carrefour 24 ; RV1C24 : renvoi de vert (1 : voie principale, 2 : secondaire) du C24.

 :

- B45 : tourne-à-droite connecté sur B9.
- B50 est quasiment inutile : peu de véhicules passent par cette boucle ou alors ils sont en cours de rabattement et passent simultanément sur B49 et B50, ceci à cause des stationnements sur la rue de la Commanderie.
- B137, B138 : les boucles sont franchies juste après le passage du feu au vert.
- B9 : cette boucle est quelque peu indépendante des feux, elle peut en effet recevoir des véhicules à tout moment en provenance des boucles B45 ou B49 ; par contre, elle est plus fonction de la traversée des piétons puisque située juste en amont d'un passage protégé par un feu clignotant.

4.2 Détermination des sas de remplissage

Un "sas de remplissage" est la zone comprise entre une boucle magnétique et le feu le plus proche. L'unité de mesure utilisée est le nombre de véhicules moyens qui sont dans cette zone au feu rouge, **à saturation**.

La mesure est effectuée par comptage informatique du nombre de véhicules qui traversent la boucle lorsque le feu est rouge. Plusieurs cycles ont été analysés et la valeur la plus probable a été retenue comme représentative. En toute rigueur, nous aurions dû prendre la valeur maximale mais celle-ci présente l'inconvénient d'être quelquefois faussée par le passage au rouge de certains véhicules. La détermination de ces sas a été validée par une observation sur le terrain. Les résultats obtenus sont les suivants :

- B35, B36, B37 : Sas de remplissage : 7 à 8 voitures.
- B45, B46, B47, B48 : Sas de remplissage : 3 ou 4 voitures.
- B49, B50 : Sas de remplissage : 2 voitures pour B50, 3 voitures pour B49.
- B51, B52 : Sas de remplissage : 8 voitures.
- B137, B138 : Sas de remplissage : 6 voitures (sas avant le feu et boucles après).
- B9 : Sas de remplissage : néant.

4.3 Liens entre feux et boucles

Il s'agit ici de voir quelles sont les influences des feux sur les boucles :

lorsque $RV1_{C38} = 1$

B48 -> B35 sauf changement de file vers B36 ou 37.

B47 -> B36 sauf changement de file vers B35 ou 37.

B46 -> B37 sauf changement de file vers B35 ou 36 ; quelques

pertes vers B138.

B45 -> B9 (tourne-à-droite).

B49, B50, B51, B52, B137, B138 sont bloquées au rouge.

lorsque $RV2_{C38} = 1$

B52 -> B138 : sauf changement de file vers B137.

B51 -> B137 : sauf changement de file vers B138 ou B51 -> B35, B36, B37 en tourne-à-gauche.

B49 -> B9 tout droit ou B49 -> B35, B36, B37 en tourne-à-gauche après que $RV1_{C38} = 1$.

B50 : souvent en doublette avec B49 (le même véhicule à cheval entre les deux boucles).

B45, B46, B47, B48 sont bloquées au rouge.

4.4 Estimation des pourcentages directionnels

Dans la présente partie, nous avons cherché à déterminer les pourcentages directionnels^{*} sur la zone-test du carrefour 38. Le carrefour a trois voies d'entrée (1, 2, 3) et trois voies de sortie (4, 5, 9) {voir schéma C38 en annexe B}.

Soit p_{ij} le pourcentage directionnel d'une entrée i vers une sortie j : $p_{ij} = e_{ij}/e_i$ où e_i est le débit¹⁵ total du chaînon^{*} i et e_{ij} le débit directionnel de i à j .

$S_j = \sum_i p_{ij} \cdot e_i + \delta_j$ où S_j est la mesure de la sortie du carrefour sur le chaînon j , $\sum_i p_{ij} \cdot e_i$ la

somme des proportions des chaînons d'entrée pour la sortie j et δ_j le bruit supposé de moyenne nulle et de variance connue.

Dans le cas d'un carrefour à six branches à sens unique (trois branches d'entrées e_1, e_2, e_3 et trois branches de sorties s_4, s_5, s_9) et avec les notations définies pour le carrefour-test :

$$\begin{cases} s_4 = p_{14} \cdot e_1 + p_{24} \cdot e_2 + p_{34} \cdot e_3 \\ s_5 = p_{15} \cdot e_1 + p_{25} \cdot e_2 + p_{35} \cdot e_3 \\ s_9 = p_{19} \cdot e_1 + p_{29} \cdot e_2 + p_{39} \cdot e_3 \end{cases}$$

ou, sous forme matricielle : $\begin{pmatrix} s_4 \\ s_5 \\ s_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{14} & p_{24} & p_{34} \\ p_{15} & p_{25} & p_{35} \\ p_{19} & p_{29} & p_{39} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{pmatrix}$

¹⁵Nombre de véhicules par unité de temps

D'autre part, $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p14 & p15 & p19 \\ p24 & p25 & p29 \\ p34 & p35 & p39 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ ce qui signifie que tous les véhicules

qui entrent par une entrée sortent par l'une quelconque des trois sorties.

Nous sommes ici en présence d'un système de six équations pour neuf inconnues. Le système n'étant pas soluble, nous allons par conséquent faire des hypothèses sur certains pourcentages directionnels.

D'après la géographie du carrefour, nous pouvons supposer que $p25 = 0$, $p39=0$.

Nous avons encore sept inconnues pour six équations. Nous allons ajouter une équation supplémentaire en dissociant notre voie 1 en deux voies 6 (B46 à 48) et 7 (B45).

Le système devient : $\begin{pmatrix} s4 \\ s5 \\ s9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p64 & p74 & p24 & p34 \\ p65 & p75 & 0 & p35 \\ p69 & p79 & p29 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} e6 \\ e7 \\ e2 \\ e3 \end{pmatrix}$

et $\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p64 & p65 & p69 \\ p74 & p75 & p79 \\ p24 & 0 & p29 \\ p34 & p35 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$

En supposant, compte tenu de la géographie du carrefour, que $p74=0$, $p75=0$ et $p69=0$, nous sommes maintenant en présence d'un système de sept équations pour sept inconnues.

En intégrant les quatre dernières équations dans les trois précédentes, nous obtenons :

$$\begin{pmatrix} s4 \\ s5 \\ s9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p64 & 0 & p24 & p34 \\ 1-p64 & 0 & 0 & 1-p34 \\ 0 & 1 & 1-p24 & 0 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} e6 \\ e7 \\ e2 \\ e3 \end{pmatrix}$$

Ce système est-il soluble ?

La dernière équation nous permet d'exprimer $p24 = 1 + \frac{e7 - s9}{e2}$ d'où

$$\begin{cases} s4 - e2 - (e7 - s9) = p64 * e6 + p34 * e3 \\ -s5 + e6 + e3 = p64 * e6 + p34 * e3 \end{cases}$$

Ces deux équations sont dépendantes, par conséquent le système n'est pas soluble. C'est

pourquoi nous avons donc décidé de nous orienter vers la solution du filtrage de Kalman qui nous permet de faire des suppositions sur ces pourcentages directionnels et de les valider ou de les faire évoluer sur une série de mesures à l'aide de critères statistiques. Pour cela, nous nous sommes inspiré des travaux de Kessaci [Kessaci & al. 90] [Kessaci 88].

4.4.1 Rappels sur le filtrage de Kalman

Pour un processus discret représenté par ses équations d'état,

$$\begin{cases} X_{k+1} = A \cdot X_k + B \cdot U_k + V_k \\ Y_k = C \cdot X_k + W_k \end{cases}$$

X représente le vecteur d'état du système,

U la commande appliquée,

Y la sortie,

V le bruit d'estimation (d'évolution) et W le bruit de mesure, ces deux bruits sont considérés blancs, gaussiens et de variances respectives Q et R [Najim 88].

Il s'agit de déterminer \hat{X}_k la meilleure estimation de X_k à partir des mesures Y_k .

Le critère utilisé est la minimisation de la variance de l'erreur, les équations générales du filtre de Kalman sont les suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{k+1/k+1} = A \cdot \hat{X}_{k/k} + K_{k+1} \cdot (Y_{k+1} - C \cdot A \cdot \hat{X}_{k/k}) \\ K_{k+1} = F_{k+1/k+1} \cdot C^T \cdot R_{k+1}^{-1} \\ F_{k+1/k+1} = F_{k+1/k} - F_{k+1/k} \cdot C^T \cdot (C \cdot F_{k+1/k} \cdot C^T + R_{k+1}^{-1} \cdot C \cdot F_{k+1/k}) \\ F_{k+1/k} = A \cdot F_{k/k} \cdot A^T + Q_k \end{array} \right.$$

$F_{k/k}$ est la matrice de variance-covariance de l'erreur d'estimation $F_{k/k} = E(\tilde{X}_k \cdot \tilde{X}_k^T)$, avec $\tilde{X}_k = X_k - \hat{X}_{k/k}$.

4.4.2 Pourcentages directionnels par filtrage de Kalman

Le problème est posé de la manière suivante, sous forme d'équations d'état :

$$\begin{cases} p_{k+1} = p_k + V_k \\ s_k = E_k \cdot p_k + W_k \end{cases}$$

E_k est la matrice des débits qui correspond à chaque couple entrée-proportion à l'instant k . Les

autres variables ont été décrites auparavant.

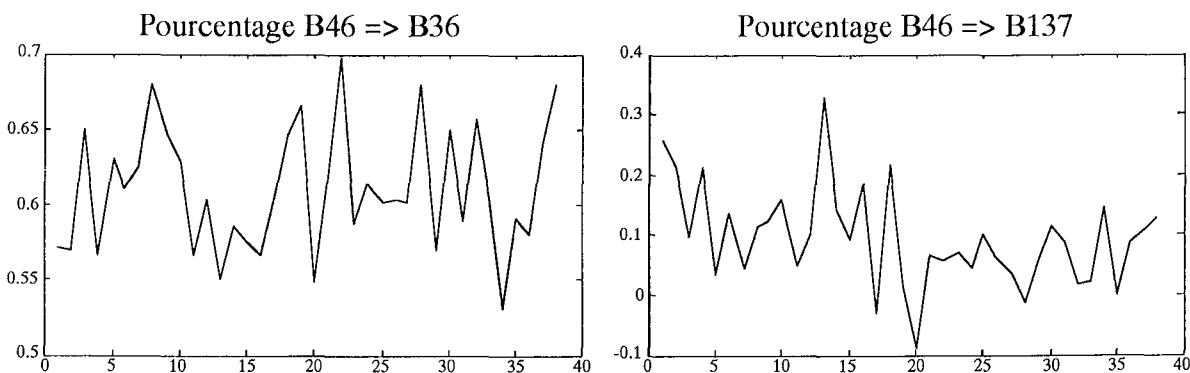
Dans ce cas, les équations de Kalman s'écrivent :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{k+1/k+1} = \hat{p}_{k/k} + K_{k+1}(\hat{s}_{k+1} - E_k \cdot \hat{p}_{k/k}) \\ K_{k+1} = F_{k+1/k+1} \cdot E_k^T \cdot R_{k+1}^{-1} \\ F_{k+1/k+1} = F_{k+1/k} - F_{k+1/k} \cdot E_k^T \cdot (E_k \cdot F_{k+1/k} \cdot E_k^T + R_{k+1}^{-1} \cdot E_k \cdot F_{k+1/k}) \\ F_{k+1/k} = F_{k/k} + Q_k \end{array} \right.$$

4.4.3 Quelques courbes de l'évolution des pourcentages directionnels

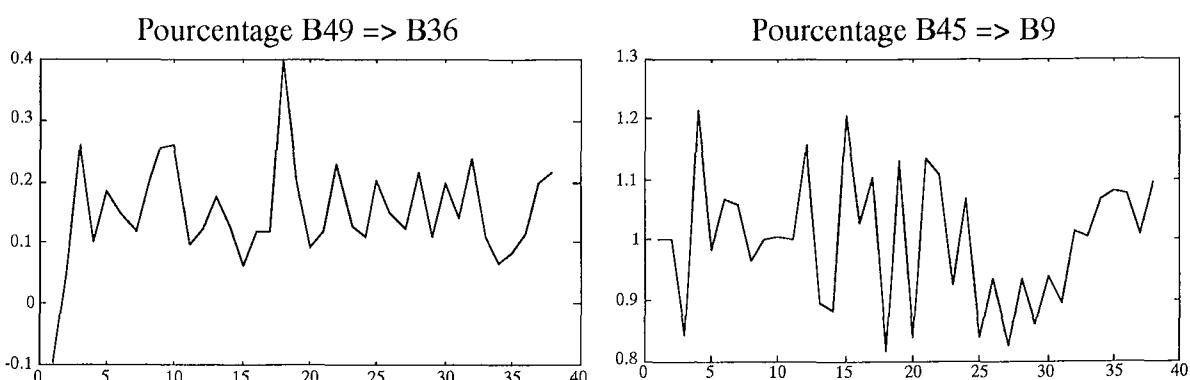
Ci-dessous sont présentées les évolutions temporelles des pourcentages directionnels pendant une heure de 13H45 à 14H45 le jeudi 17 septembre 1992.

Pour les quatre courbes ci-dessous, en abscisse sont indiqués les numéros de cycle, en ordonnée les pourcentages directionnels ramenés à 1.



Ce pourcentage tourne autour de 60 % (entre 55 et 70 %).

Ce pourcentage, très faible, est proche de 10 %. Il arrive que, à cause du bruit, nous obtenions un pourcentage négatif.



Ce pourcentage a une valeur comprise entre 15 et 20 % et fluctue entre 8 et 30 %, excepté un point plus fort au 18^{ème} cycle.

Ce pourcentage est censé être toujours quasiment égal à 1. Or nous voyons ici que celui-ci fluctue entre 80 et 120 %.

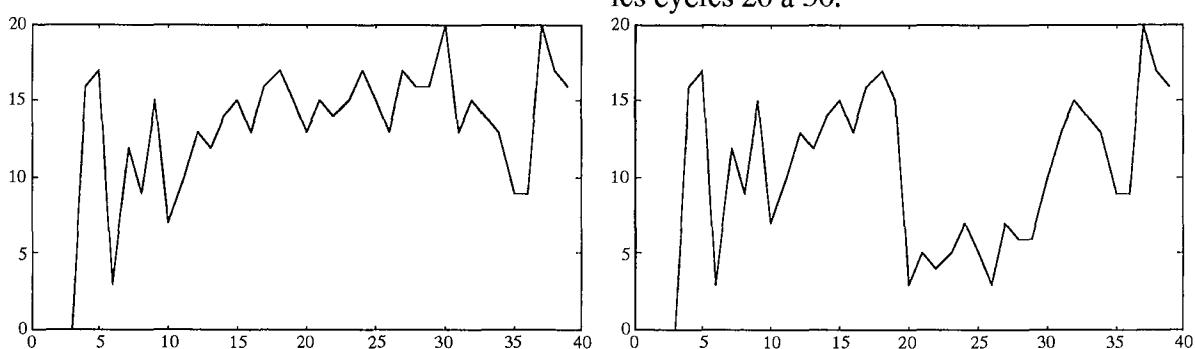
Au vu des courbes ci-dessus, nous nous apercevons que les pourcentages directionnels fluctuent de manière non négligeable, autrement dit que ces valeurs sont fortement bruitées. Il est par conséquent plus difficile de détecter une anomalie par ce biais. Nous verrons dans le paragraphe suivant que d'importantes anomalies peuvent tout de même être observées.

4.4.4 Détection d'erreurs par l'étude des pourcentages directionnels

Sur des données acquises durant la même période que dans le paragraphe précédent, nous avons volontairement simulé un défaut (perte de 10 véhicules par cycle) sur la boucle 45 pour voir comment cela se traduirait sur les pourcentages directionnels.

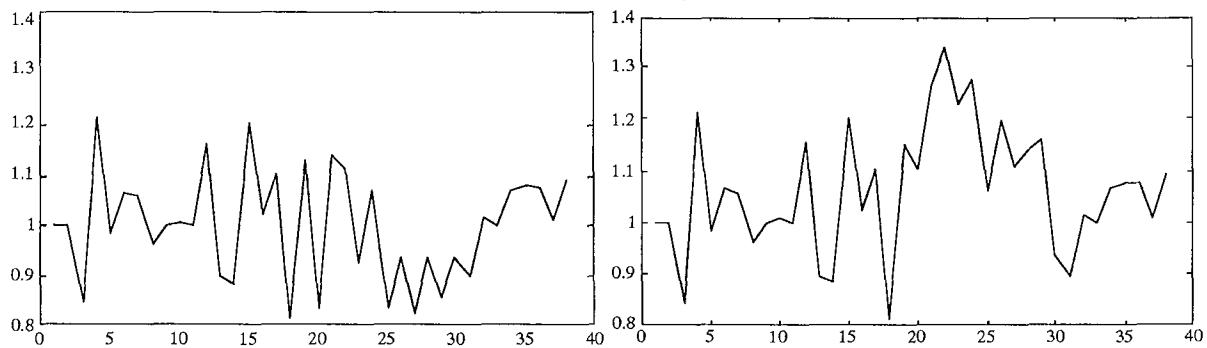
Pour les deux courbes ci-dessous, en abscisse sont indiqués les numéros de cycle, en ordonnée le nombre de véhicules par cycle.

Nombre de véhicules par cycle sur la boucle 45, sans erreur. Nombre de véhicules par cycle sur la boucle 45, avec perte de 10 véhicules par cycle sur les cycles 20 à 30.

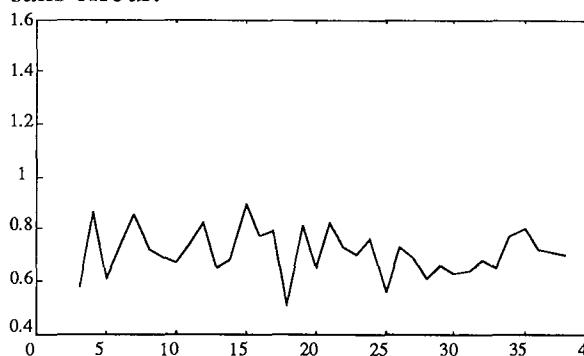


Pour les quatre courbes ci-dessous, en abscisse sont indiqués les numéros de cycle, en ordonnée les pourcentages directionnels ramenés à 1.

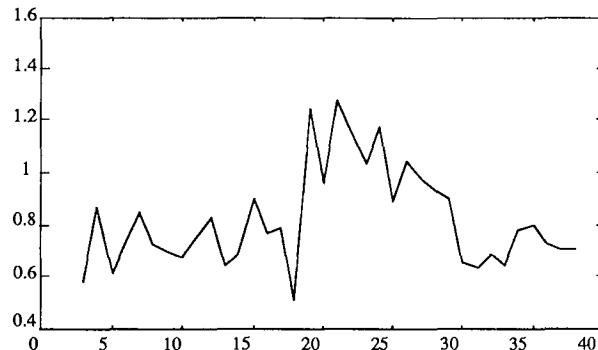
Pourcentage directionnel de B45 vers B9, sans erreur. Pourcentage directionnel de B45 vers B9, avec erreurs



Pourcentage directionnel de B49 vers B9, Pourcentage directionnel de B49 vers B9,
sans erreur.



avec erreurs



D'après les courbes précédentes, la modification substantielle du nombre de véhicules se traduit par une altération significative du pourcentage directionnel des véhicules provenant de la boucle concernée. En conséquence, le pourcentage "complémentaire" (les véhicules provenant d'autres origines, ici B49, et aboutissant sur la même B9) est lui aussi perturbé.

Sur les courbes précédentes, nous avons simulé une erreur de 10 véhicules par cycle pour que celle-ci soit facilement visible à l'œil nu. En pratique, nous avons établi un programme de fenêtre mobile pour l'étude de la moyenne. Il est possible avec ce type de programme de descendre jusqu'à environ trois véhicules par cycle avec une fenêtre mobile de cinq cycles. Une fenêtre mobile plus petite donne des résultats encore trop bruités alors qu'une fenêtre plus grande atténue trop les phénomènes. En ce qui concerne le temps réel, il va de soi qu'une fenêtre mobile de n cycles doit attendre au minimum n cycles avant de déceler une situation inhabituelle.

5. Variables utilisables à partir d'une boucle magnétique

Bibliographie : [Cohen 90] [Glayre & al. 88] [Lesort]

Différents paramètres sont utilisés par les systèmes de régulation de trafic urbain pour élaborer leur stratégie de commande ; ces paramètres sont extraits de l'information émise par les capteurs.

Les paramètres couramment utilisés en régulation de trafic urbain basée sur des boucles magnétiques sont :

- * Les flux exprimés par les nombres de véhicules par unité de temps.
- * Les concentrations exprimées par les taux d'occupation ou intervalles véhiculaires.

Les boucles peuvent également donner des informations telles la remontée de file d'attentes ou la vitesse. Sur certains systèmes, d'autres types de capteurs permettent de déterminer d'autres variables. Le radar permet de mesurer la vitesse, les détecteurs de pollution

ou de bruit des taux de nuisance.

Nous allons présenter dans la suite les variables qui sont extraites de nos campagnes d'acquisition. Notre objectif est de déterminer la pertinence de ces variables pour modéliser les risques d'apparition d'anomalies de régulation du trafic urbain [Thiriet & al. 92]. Notre zone d'essai est le carrefour 38. Il possède l'avantage d'être instrumenté sur presque tout son pourtour.

La circulation automobile en milieu urbain n'est pas un processus constant, puisqu'elle est soumise au rythme des feux tricolores ; nous pouvons en fait distinguer quatre états de fonctionnement que nous retrouvons cycliquement :

- * **L'état d'arrêt** : lorsque le feu est rouge.
- * **L'état transitoire de montée en régime** : lorsque le feu vient de passer au vert et que l'onde de démarrage se propage sur la file de véhicules.
- * **Le régime établi** : lorsque les véhicules passent en vitesse de croisière et qu'ils ne sont plus ni en phase* de démarrage ni en phase de ralentissement due au passage du feu à l'orange et au rouge. Nous considérons également comme régime établi des véhicules roulant lentement mais pour une raison autre que le passage des feux au rouge (incident, accident,...).
- * **La phase transitoire de ralentissement** : à partir du moment où les véhicules aperçoivent le changement d'état du feu tricolore vers l'orange et le rouge.

Pour cela, il faut observer le trafic à travers une sorte de fenêtre *stroboscopique* qui "filtre" les quatre états de trafic et compare les états entre eux sur des cycles différents.

5.1 Comptage

Une voiture est généralement comptée sur une boucle lorsque celle-ci passe de 1 à 0 ; ce choix est préférable au passage de 0 à 1 car de cette manière la voiture est comptabilisée lorsqu'elle est effectivement passée.

5.2 Taux d'occupation

Celui-ci est calculé pour chaque boucle par la proportion de temps où elle est occupée sur le temps total de la période considérée, il est généralement exprimé en %.

Nous pouvons recenser cinq manières de déterminer le taux d'occupation :

METHODE DE CALCUL

COMMENTAIRE

- 1) Sur une période fixe non synchronisée : cette méthode est celle utilisée par l'ordinateur SIEMENS de régulation du trafic à Nancy par exemple et consiste à prendre une période figée (90 secondes à Nancy) et de calculer le taux d'occupation sur cette période.
- 2) Sur une période synchronisée avec la durée du cycle réel du carrefour concerné¹⁶.
- 3) Sur une période synchronisée sur le temps de vert du carrefour concerné, comme cela est effectué sur le système de détection d'anomalies développé et mis en place au poste central de la circulation [Jouannet 89].
- 4) Sur une période synchronisée sur le temps de vert avec un décalage* tenant compte de la distance existant entre le barrage de boucles et le barrage de feux concerné {voir figures 5.3 a & b § 5.3}.

Cette méthode génère un lissage sur plusieurs cycles ; il nous semble par conséquent difficile de “faire du temps réel” avec ce paramètre.

L'information donnée se suffit à elle-même et est comparable aux périodes précédentes et suivantes puisqu'elle se réfère à un seul cycle. Toutefois, tous les états de trafic sont imbriqués et mélangés et il s'agit donc ici encore d'une information moyennée sur une fenêtre temporelle qui inclut les temps de vert et de rouge.

Cette méthode donne une bonne image de la situation de trafic à condition que la boucle ne soit pas trop éloignée du feu tricolore concerné.

Cela améliore l'image du trafic fournie par rapport au calcul précédent ; la difficulté inhérente à la généralisation de cette méthode réside dans le paramétrage de la valeur du décalage qui nécessite des mesures sur le terrain ou un traitement statistique.

¹⁶Carrefour concerné : c'est le carrefour en général le plus proche de la boucle magnétique dont on étudie le signal, en tout état de cause le carrefour ayant la plus forte influence sur cette boucle.

- 5) En régime établi, c'est-à-dire pendant le temps durant lequel les véhicules traversent la boucle en ayant atteint leur vitesse de croisière {voir figure 5.3.c § 5.3}.

Le taux d'occupation défini est représentatif de l'état stabilisé du trafic et n'est plus le résultat moyen de différents états. La grande difficulté consiste à déterminer le régime établi du trafic.

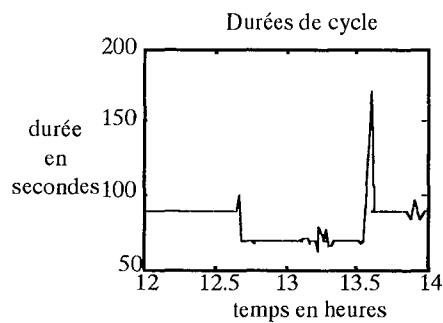


Figure 5.2.a

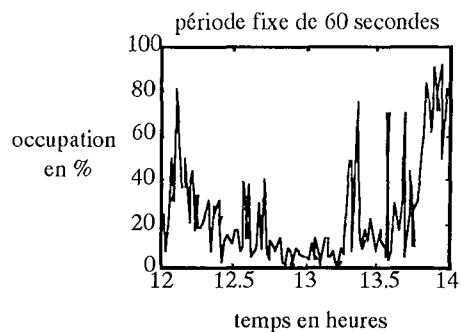


Figure 5.2.b

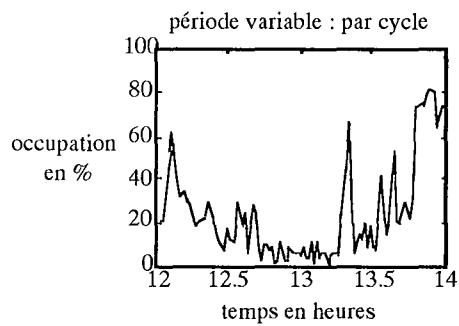


Figure 5.2.c

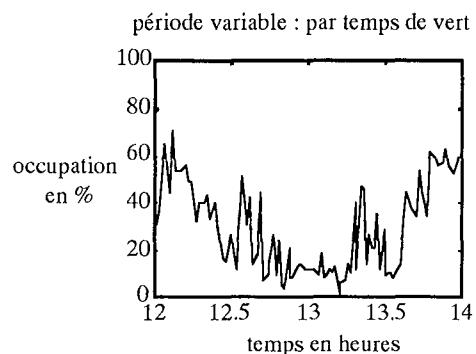


Figure 5.2.d

Sur les figures 5.2.a à 5.2.d sont schématisés l'évolution des temps de cycle de 12H à 14H le 12/9/91 et les taux d'occupation calculés suivant les trois principes développés précédemment. Nous remarquons :

Figure 5.2.a : L'évolution des temps de cycle : à l'heure du repas, le flux est plus faible de 12H30 à 13H30, auquel cas le système de régulation nancéien est programmé afin de réduire la durée du cycle. Les petits pics sont dus aux anticipations ou prolongations de vert demandées par le SAE¹⁷ des transports en commun, les pics d'amplitude plus importante sont dus à la synchronisation sur l'horloge du nouveau cycle (transitoire de changement de cycle).

Figure 5.2.b : Il s'agit d'un taux d'occupation calculé sur une durée fixe de 60 secondes, non synchronisée avec la durée de nos cycles.

¹⁷Système d'Aide à l'Exploitation

Figure 5.2.c : Le taux d'occupation est synchronisé sur les cycles.

Figure 5.2.d : Le taux d'occupation est calculé sur les temps de vert.

Il est évident que le signal 5.2.b est plus bruité que les deux autres. Nous pouvons également constater des différences entre les figures 5.2.c et d ; le taux d'occupation est plus faible à 12,6 heures et plus fort à 13,3 heures, par exemple, sur la première figure que sur la seconde.

Deux autres variables, dérivées du taux d'occupation, sont utilisées par certaines stratégies :

- ⌚ **Concentration** : Nombre total de véhicules par unité de longueur de voie ou d'itinéraire.
- ⌚ **Intervalle véhiculaire ou écart (headway)** : intervalle temporel qui peut être mesuré entre deux fronts descendants de l'état du détecteur d'une boucle ; l'intervalle véhiculaire peut également être déterminé par la distance entre deux véhicules.

5.3 Vitesse

La vitesse qui peut être estimée avec **une seule** boucle magnétique est une vitesse moyenne calculée de la manière suivante :

Après estimation de la longueur moyenne d'un véhicule (\mathcal{L}) et connaissant la longueur de la boucle (ℓ), il est possible de mesurer le temps d'occupation d'une boucle (t), la vitesse (v) sera donnée par :

$$v = \frac{\ell + \mathcal{L}}{t}$$

Cette façon de déterminer la vitesse peut être validée en mesurant les ralentissements lors du remplissage des sas.

En utilisant seulement une boucle par voie, comme nous le faisons, la vitesse que nous pouvons déterminer est une vitesse moyenne qui donne une idée du comportement des véhicules mais qui n'est pas une mesure précise de celle-ci. Cette vitesse, bien qu'approximative, nous permet de "calibrer" notre *fenêtre stroboscopique* sur le carrefour afin de dégager les quatre phases* de fonctionnement de la circulation urbaine soumise au rythme des feux tricolores {chap. 6}.

- ⌚ **Vitesse d'un flot ou vitesse moyenne spatiale** : moyenne harmonique des vitesses mesurées en un point (d'après J. B. Lesort).

$$\frac{1}{u(x,t)} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \frac{1}{V_i} \text{ avec } v \text{ le nombre de véhicules.}$$

☞ *Accélération* : pour nous impossible à déterminer vu l'instrumentation dont nous disposons.

Les figures 5.3.a, 5.3.b et 5.3.c page suivante présentent 3 minutes d'acquisition sur le carrefour 38.

La figure 5.3.a montre l'évolution du cycle en quatre phases :

- 1) Le temps de sécurité (ici 6,5 secondes) lorsque les feux sont tous au rouge ou à l'orange.
- 2) Le temps de vert sur la voie principale (ici 32 secondes).
- 3) Le temps de sécurité.
- 4) Le temps de vert sur la voie secondaire (ici 45 secondes).

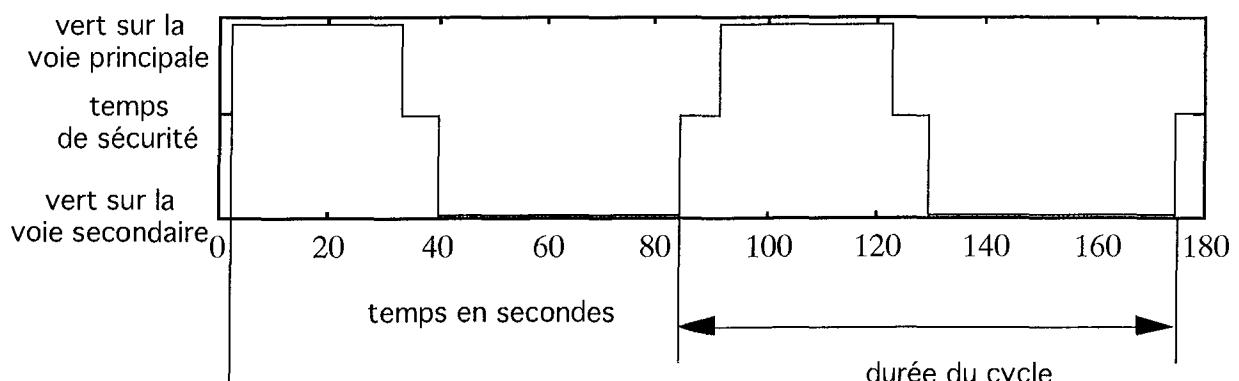
La figure 5.3.b présente la traversée de véhicules sur la boucle 45. En superposant les figures 5.3.a et 5.3.b, nous pouvons estimer la valeur du décalage entre boucle et feux (ici de l'ordre de 7 à 8 secondes).

La figure 5.3.c illustre l'évolution de la vitesse des véhicules passant sur la boucle ; cette vitesse est déterminée au moment où le véhicule en question quitte la boucle.

Nous distinguons trois étapes sur le diagramme :

- 1) La phase de démarrage des véhicules.
- 2) Le régime établi : les véhicules traversent avec une vitesse de croisière fonction de la géographie et des conditions de trafic.
- 3) Deux modes :
 - ✿ Une phase de ralentissement puis une phase durant laquelle la boucle reste occupée, un véhicule est en attente sur celle-ci.
 - ✿ Une phase de remplissage du sas.

Figure 5.3.a : Evolution des feux durant trois minutes
Evolution des feux sur 3 minutes



Boucle n°45 12/9/91 de 12H00 à 12H03

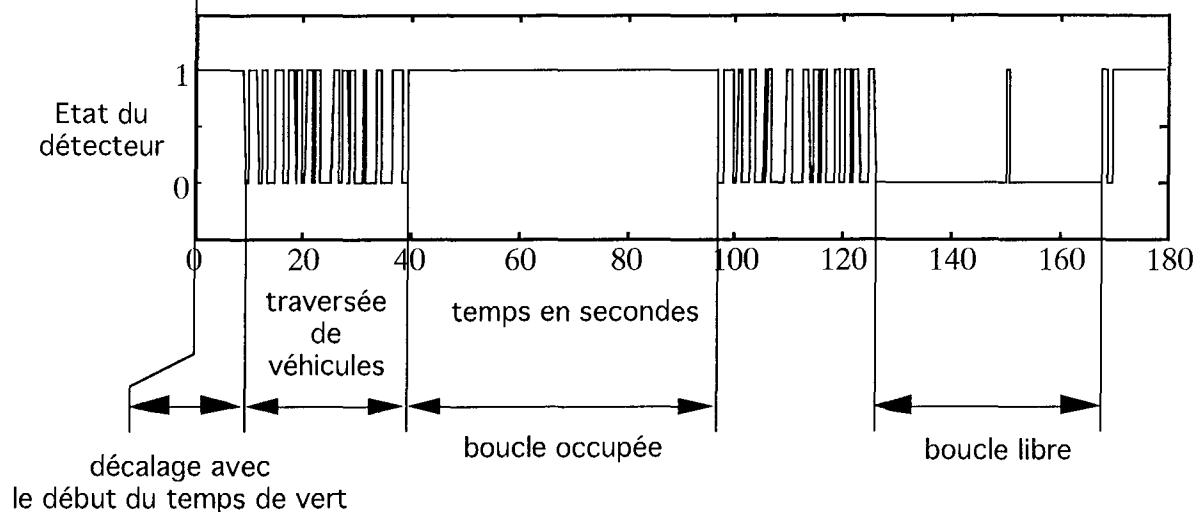


Figure 5.3.b : Occupation d'une boucle pendant trois minutes

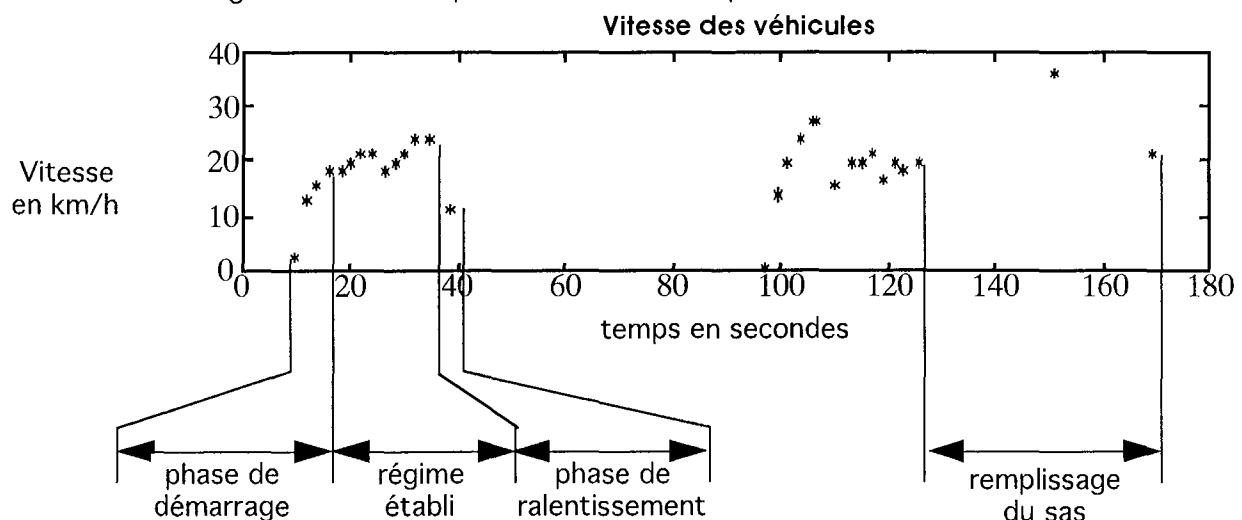


Figure 5.3.c : Vitesses des véhicules durant trois minutes

5.4 Longueurs de files

☞ *Longueur de file* : longueur totale d'une file de véhicules, espaces compris.

Les longueurs de file pourraient être estimées par rapport au temps de remplissage ou de vidange de sas. Par la méthode des doubles boucles, nous pourrions également estimer précisément la vitesse, faire de la différenciation de véhicules et détecter le sens de marche des véhicules [SIEMENS 90] {Chap. 3 § 4.2}.

6. Conclusion

Ce chapitre nous a aidé à poser le problème. Après un rappel des principales méthodes utilisées en modélisation du trafic et des expériences antérieurement menées à Nancy, nous définissons une zone-test pour effectuer des mesures. Cette zone-test est un carrefour stratégique de Nancy. Une topologie de ce carrefour ainsi qu'une estimation des pourcentages directionnels par filtrage de Kalman sont proposées.

Nous avons présenté ensuite les paramètres qui peuvent être utilisés pour représenter le trafic. Nous avons vu que les façons de calculer ces paramètres, les périodes utilisées, particulièrement dans le cas du taux d'occupation, pouvaient nous donner une information plus ou moins riche. Nous avons proposé une fenêtre stroboscopique qui permet de déconvoluer et par conséquent d'étudier séparément les différentes phases d'évolution de la circulation induites par le séquencement des feux tricolores.

Nous verrons plus loin l'intérêt de ces paramètres pour détecter et classer les anomalies.

Chapitre 5 - Détection par modèle

1. Introduction

Notre objectif ici est de trouver un modèle du comportement du trafic sur le carrefour-test n°38 qui nous permette de comparer les prédictions de celui-ci aux mesures réelles et par conséquent de détecter une "situation inhabituelle". Nous nous sommes orientés vers une modélisation des flux des véhicules quittant le carrefour en fonction des véhicules entrant sur le carrefour pour obtenir un modèle dynamique. La difficulté de trouver un bon modèle réside dans le fait qu'il existe une part aléatoire non négligeable dans le comportement des usagers sur le réseau routier. Dans le problème qui nous intéresse, deux paramètres sont relativement aléatoires, bien que fluctuant entre certaines bornes :

- Le pourcentage directionnel qui indique la proportion de véhicules qui, provenant d'une voie i d'entrée, se dirigera vers une voie j de sortie.

- La vitesse de propagation des véhicules (temps de démarrage, vitesse de croisière) qui est à la fois dépendante des autres véhicules, particulièrement en situation de forte densité, et également fonction du conducteur lui-même.

Chacun de ces deux paramètres fluctue aléatoirement, ce qui entraîne le "bruitage" du processus. De plus, la combinaison des deux paramètres accentue encore ce phénomène de "bruitage".

Nous allons mettre en place dans le paragraphe suivant un modèle de connaissance qui tente de décrire la "physique" de notre processus. Nous comparerons ensuite ce modèle à des modèles de représentation [Ljung 87] [Sibille 90]. Dans ces paragraphes, nous allons expliciter les modèles pour la sortie 5 {voir schéma §2.2}.

2. Modèle de connaissance

Le modèle de connaissance que nous proposons est inspiré de la théorie des réseaux de files d'attente.

2.1 Rappels sur les réseaux de files d'attente

Dérivée de la théorie des processus Markoviens, la théorie des files d'attente est très

utilisée en informatique et télécommunications.

Une station est composée d'une file d'attente et d'un ou plusieurs serveurs. Une station est définie par :

- le processus d'arrivée des clients,
- la discipline de service (premier arrivé premier sorti, temps partagé),
- le nombre de serveurs,
- le processus de service,
- la capacité de la file d'attente (éventuellement infinie).

2.2 Modélisation du trafic sur le carrefour

Le sas 5 est considéré comme une station qui a les caractéristiques suivantes : 2 serveurs (B137 & 138), la discipline de service est "premier arrivé premier sorti", le réseau est ouvert, monoclasse (les véhicules), la capacité de la file d'attente est de 2*6 voitures.

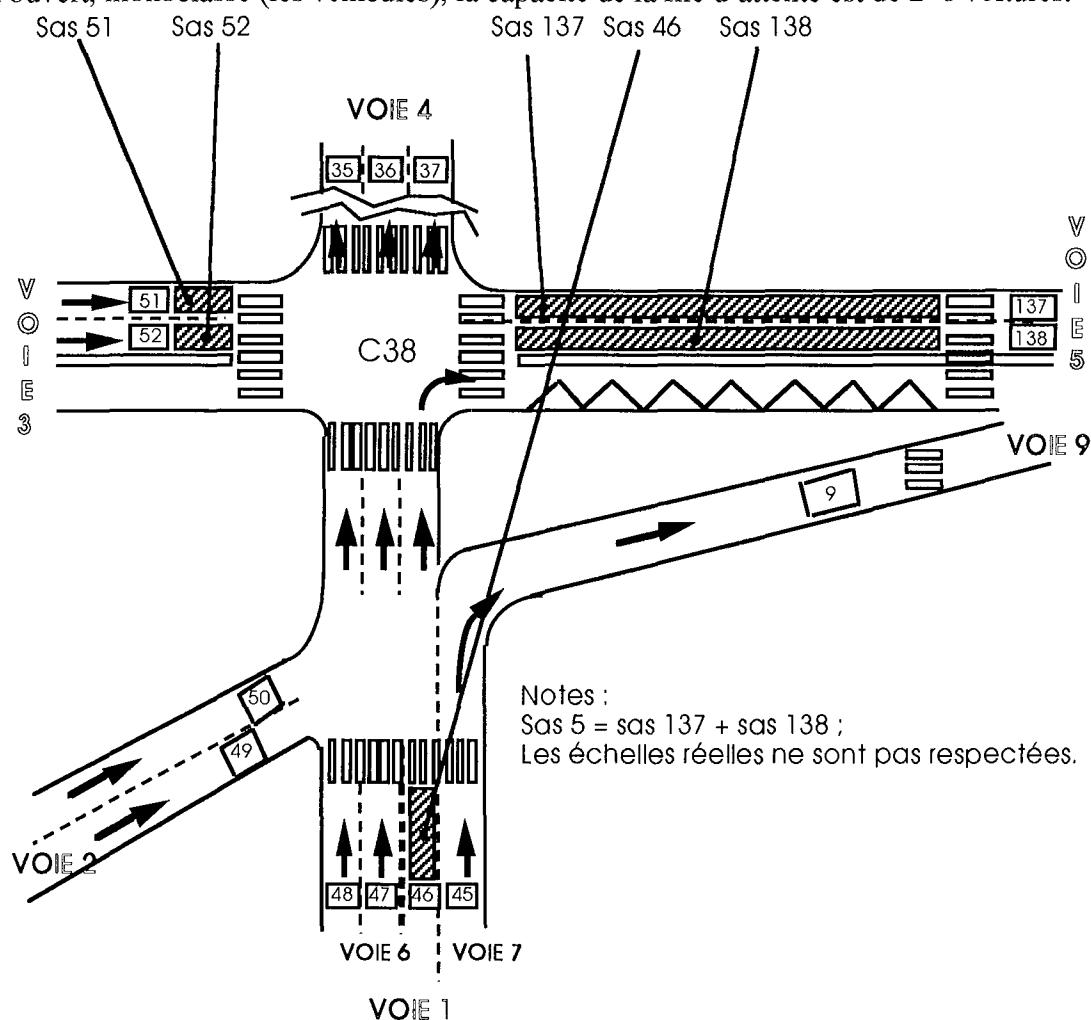


Figure 2.2.a : Le carrefour 38 et les sas de remplissage pour la voie de sortie 5

Nous rappelons qu'un cycle se déroule suivant les phases* suivantes {Chap. 4 § 5} :

- 1) le temps de sécurité,
- 2) le temps de vert sur la voie principale (ici pour B46),
- 3) le temps de sécurité,
- 4) le temps de vert sur la voie secondaire (ici pour B51 & 52, B137 & 138).

Pendant les temps de sécurité, les véhicules qui sont comptabilisés sur la boucle 46 emplissent le sas 46, tandis que les véhicules qui sont comptabilisés sur les boucles 51, respectivement 52, emplissent le sas 51, respectivement 52.

Pendant le temps de vert sur la voie principale, le sas 46 commence à se vider tandis que les véhicules comptabilisés sur la boucle 46 ont eu le temps de traverser le carrefour. De ces véhicules provenant de la boucle 46, un certain pourcentage p464 ira tout droit tandis que p465 % tournent à droite vers V5 (B137 & B138) et par conséquent remplissent le sas 5. Les véhicules comptabilisés sur les boucles 51 et 52 continuent à remplir leurs sas respectifs.

Pendant le temps de vert sur la voie secondaire, les véhicules comptabilisés sur B46 remplissent le sas 46 qui sera vidangé au cycle suivant. Le sas 5 se vidange, les sas 51 et 52 se vidangent (un pourcentage p514 des véhicules provenant de B51 se dirigera vers V4 et une partie p515 vers V5), les véhicules comptabilisés sur B51 se dirigent vers V4 pour p514% d'entre eux et vers V5 pour p515% d'entre eux, les véhicules comptabilisés sur B52 se dirigent vers V5. Le pourcentage directionnel utilisé dans ce modèle est un pourcentage directionnel moyen, calculé à partir des pourcentages obtenus par filtrage de Kalman {Chap.4 § 4.4}.

La structure du modèle peut s'exprimer sous forme de l'algorithme suivant. Cet algorithme "pseudo-parallèle" examine les situations en fonction du temps.

Evolution des feux	sas 46	sas 3 (sas 51 + sas 52)	sas 5 (sas 137 + sas 138)	boucle 46	boucle 51 + boucle 52	boucle 137 + boucle 138
temps de sécurité	remplissage	remplissage	/	remplissage sas 46	remplissage sas 3	non comptage
temps de vert voie principale	vidange du sas. p464 % des véhicules vers la voie 4. p465 % vers la voie 5. traversée des véhicules comptabilisés pendant cette durée.	remplissage	remplissage du sas avec p465 % des véhicules provenant du sas 46 et comptabilisés sur la boucle 46.	traversée du sas 46. p464 % des véhicules vont vers la voie 4, p465 % vers la voie 5.	remplissage du sas 3	non comptage
temps de sécurité	remplissage	remplissage	/	remplissage sas 46	remplissage sas 3	non comptage
temps de vert voie secondaire	remplissage	vidange p514 % des véhicules vers la voie 4, p515 % vers la voie 5	vidange	remplissage du sas 46	traversée du sas 3. p514 % des véhicules vers la voie 4, p515 % vers la voie 5	comptage des véhicules quittant le sas 5.

Naturellement, pour chacune de ces phases, il faut tenir compte d'un décalage temporel dû à la distance existante entre feux et boucles.

Ci-dessous se trouve une comparaison entre les données réelles et le modèle de référence pour des données extraites le jeudi 17 septembre 1992 entre 13H45 et 14H45.

Pour la courbe ci-dessous, en abscisse se trouvent les numéros de cycle, en ordonnée les nombres de véhicules estimés (traits pleins) et réels (traits pointillés) sur la sortie 5.

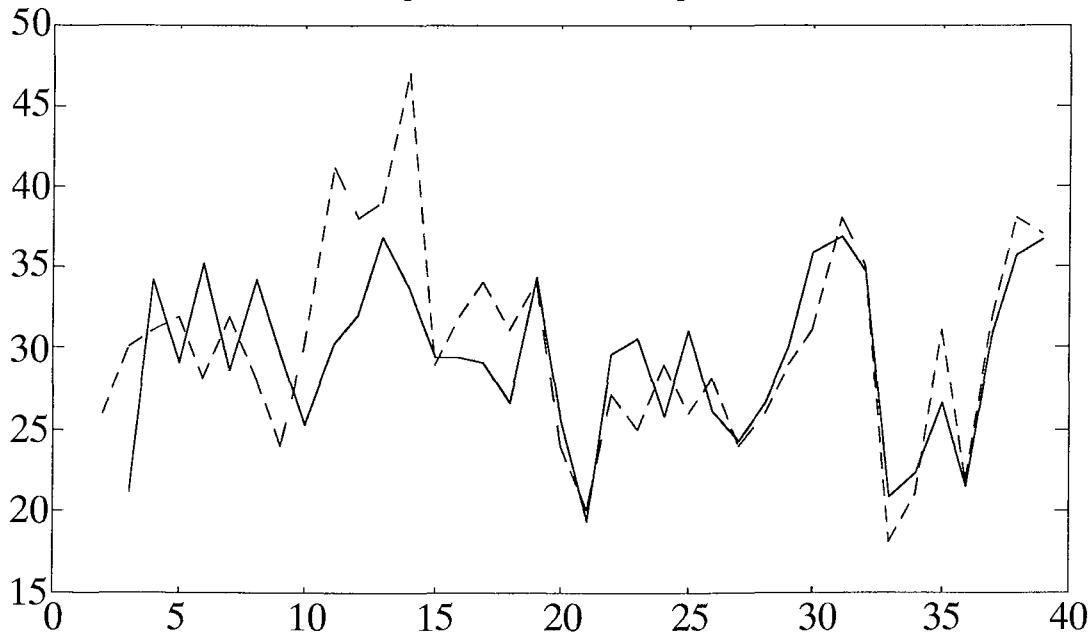


Figure 2.2.b : Modèle de connaissance

Nous pouvons constater que le modèle suit relativement bien les données réelles mis à part entre les cycles n° 10 et 15 entre lesquels nous nous trouvons vraisemblablement en présence d'une anomalie.

Les caractéristiques des résidus entre valeurs données par le modèle et valeurs mesurées sont les suivantes :

moyenne	variance	coeff corr avec entrée 46	coeff corr avec entrée 51	coeff corr avec entrée 52
0,90	20,3	0,06	0,02	-0,13

On voit ici que la variance est très élevée mais par contre les résidus sont peu corrélés avec les entrées.

Nota : nous examinerons la qualité de ces différents modèles dans un prochain paragraphe [§ 4].

3. Modèles de représentation

Pour vérifier les performances de notre modèle de connaissance, nous avons voulu le comparer à des modèles de représentation que nous avons testés et qui sont basés sur la corrélation existante entre les entrées et les sorties. Les modèles déterminés ont été testés sur des données acquises le jeudi 17 septembre 1992 entre 13H45 et 14H45 tandis que l'apprentissage a été effectué sur des données enregistrées le mercredi 6 novembre 1991 de 14H14 à 19H14.

Dans ce paragraphe sont explicités les modèles de représentation que nous avons utilisés. Le paragraphe suivant les comparera au modèle de connaissance.

Pour l'ensemble des modèles de représentation, nous utilisons comme variables d'entrée les boucles 46, 51 et 52. En effet, il a été vérifié que les autres variables n'étaient pas significatives. Ces vérifications ont été effectuées pour la régression pas à pas et les modèles ARX et PEM.

Nous faisons ici une remarque au sujet des corrélations existant entre les entrées et les sorties. Il va de soi qu'il existe des corrélations entre les entrées et les sorties mais que cette corrélation n'intègre pas seulement la liaison physique (un véhicule entrant sur le carrefour va en sortir) mais également des relations avec un état plus global du trafic. Ceci explique qu'il soit possible de trouver des corrélations entre les véhicules qui entrent par la voie 1 et les véhicules entrant par la voie 2, bien qu'il n'y ait aucun lien physique direct entre les deux. Ce phénomène complique le problème en limitant le degré de signification des corrélations.

3.1 Régression pas à pas

La méthode utilisée exploite la régression multiple pas à pas. A chaque pas peut être ajoutée ou extraite une variable. L'objectif étant de déterminer un modèle fonction de variables indépendantes. Le modèle obtenu par cette méthode est un modèle statique.

La procédure avant (forward) démarre sans variable et les inclut progressivement en fonction d'un seuil de signification.

La procédure arrière (backward) inclut d'abord toutes les variables puis les extrait une à une, également en fonction d'un seuil de signification.

Le modèle testé a les caractéristiques suivantes :

$$\hat{s5} = \text{Cste} + b_{46} * e_{46} + b_{51} * e_{51} + b_{52} * e_{52}.$$

Variable indépendante	coefficient	écart-type	t-valeur	niveau de signification
Cste	5,21	1,65	4,0090	0,0001
b ₄₆	0,40	0,09	2,8335	0,0048
b ₅₁	0,47	0,08	5,0734	0,0000
b ₅₂	0,80	0,08	11,1728	0,0000

Pour la courbe ci-dessous, en abscisse se trouvent les numéros de cycle, en ordonnée les nombres de véhicules estimés (traits pleins) et réels (traits pointillés) sur la sortie 5.

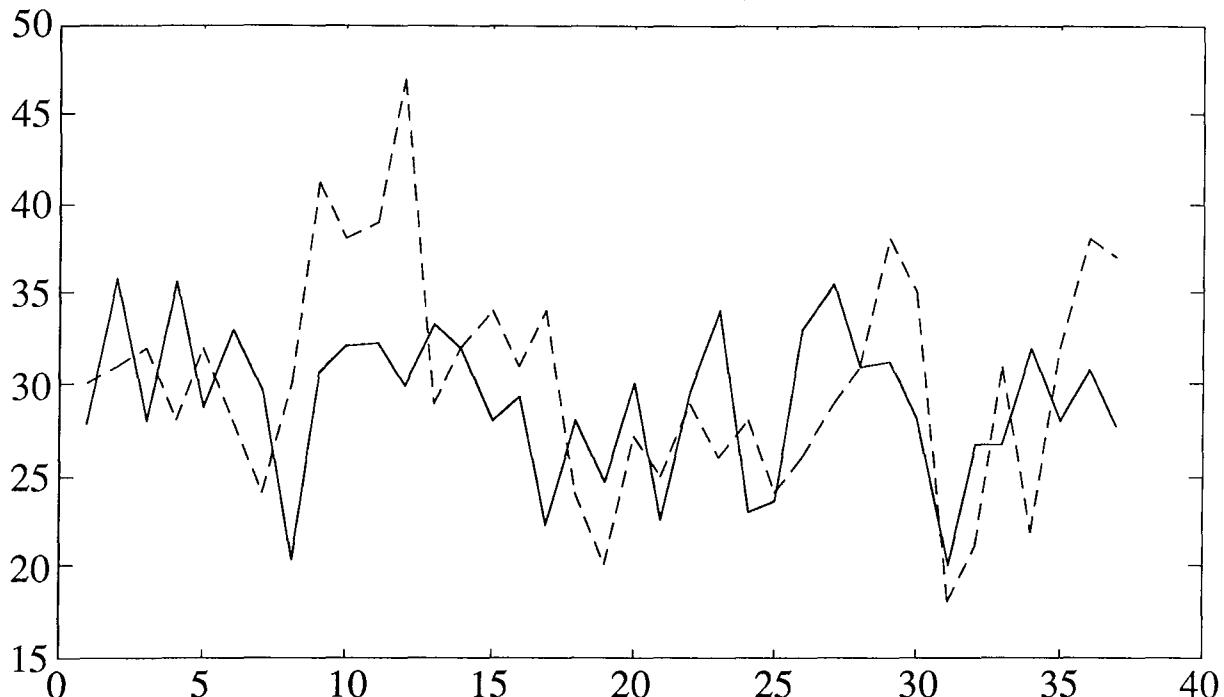


Figure 3.1 : Modèle de régression pas à pas

Ce modèle suit moins bien les valeurs réelles que le modèle de connaissance, la situation dégradée entre les cycles 10 et 15 est toujours visible. De plus le modèle s'éloigne sensiblement autour des cycles 25 à 30 [cf. § 4 la discussion et comparaison des différents modèles]. En fait, ce modèle se contente de "suivre" les entrées.

Les caractéristiques des résidus entre valeurs données par le modèle et valeurs mesurées sont les suivantes :

moyenne	variance	coeff corr avec entrée 46	coeff corr avec entrée 51	coeff corr avec entrée 52
0,27	37,2	-0,38	0,07	-0,34

On voit ici que la variance est encore plus élevée que pour le modèle précédent. Les corrélations avec les entrées 46 et 52 ne sont pas négligeables. Ceci nous amène à penser que ce modèle ne doit pas être retenu.

3.2 Modèle ARX

Nous avons utilisé le modèle ARX (auto-régressif avec entrée externe) qui fait partie de la famille des modèles du type fonction de transfert [Sibille 90]. Le modèle ARX est un modèle de la forme $A(q).S(t) = B(q).E(t - nk) + \delta(t)$ avec E les entrées, S les sorties et δ l'erreur de l'équation aux différences ou erreur de prédiction, A et B sont les matrices en fonction de q

(l'opérateur décalage). Cette fonction cherche les paramètres du modèle estimant au mieux les données en utilisant la méthode des moindres carrés. Il s'agit ici d'un modèle linéaire dynamique.

$A(q).s(t) = B_{nc46}(q).e_{nc46}(t - n_{k46}) + B_{nc51}(q).e_{nc51}(t - n_{k51}) + B_{nc52}(q).e_{nc52}(t - n_{k52}) + \delta(t)$, où n_{k46} , n_{k51} et n_{k52} représentent les délais respectifs des entrées 46, 51 et 52.

Nous avons recherché la structure de modèle de type ARX minimisant la fonction perte*.

Cette structure est de type 0 délai pour chacune des trois entrées, 0 paramètre pour A , 1 paramètre pour chacune des deux entrées 46 et 51, 2 paramètres pour la boucle 52.

La fonction perte (“loss function”) est de 0,1887.

Dans notre cas, $s(t) = b_1/46.e(t) + b_1/51.e(t) + b_1/52.e(t) + b_2/52.e(t-1) + \delta(t)$.

Les paramètres du modèle testé ici sont les suivants :

$$B_{nc46} = 0,4159$$

écart-type 0,0973

$$B_{nc51} = 0,5048$$

écart-type 0,0819

$$B_{nc52} = 0,6985 \quad 0,3882$$

écart-type 0,0859 \quad 0,0793

$$A = 1$$

Pour la courbe ci-dessous, en abscisse se trouvent les numéros de cycle, en ordonnée les nombres de véhicules estimés (traits pleins) et réels (traits pointillés) sur la sortie 5.

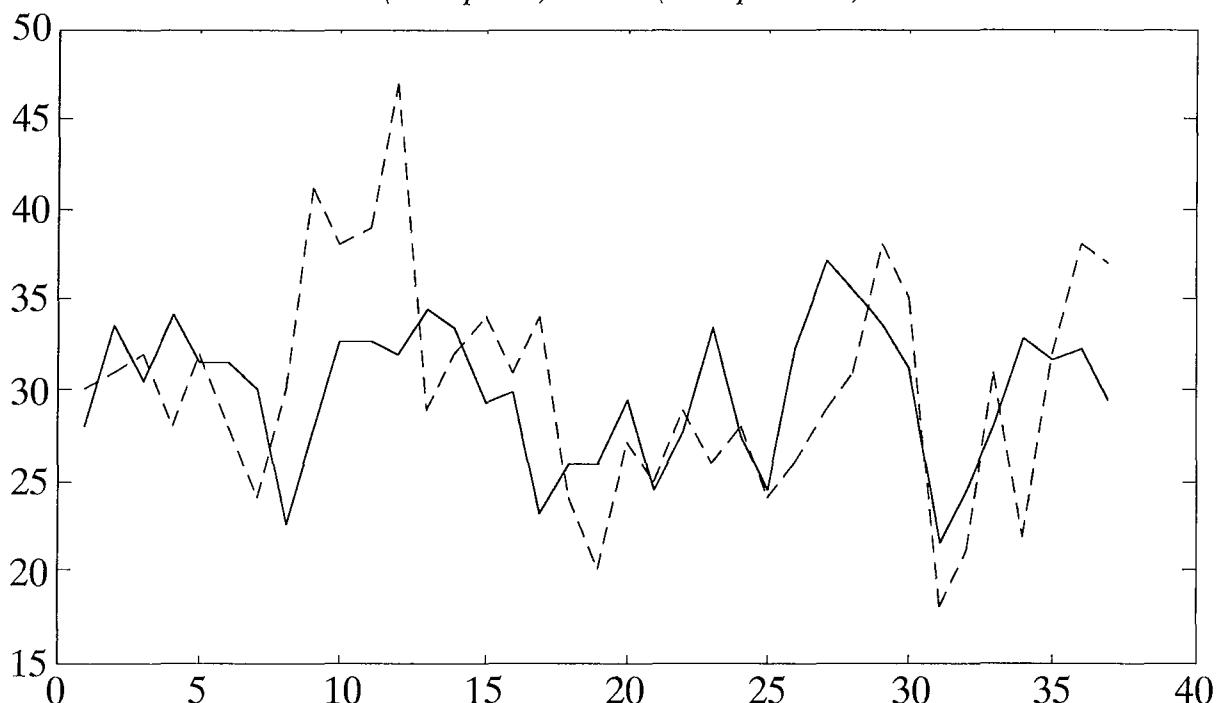


Figure 3.2 : Modèle ARX

D'après les comparaisons proposées [§ 4], nous pouvons constater que les modèles ARX et régressifs se valent à peu près puisque les résultats de la somme des carrés des écarts sont

globalement meilleurs pour le modèle régressif testé le mercredi 6 novembre 1991 tandis que le modèle ARX est meilleur le jeudi 17 septembre 1992.

Les caractéristiques des résidus entre valeurs données par le modèle et valeurs mesurées sont les suivantes :

moyenne	variance	coeff corr avec entrée 46	coeff corr avec entrée 51	coeff corr avec entrée 52
0,23	35,6	-0,43	0,07	-0,31

La moyenne n'est pas significativement différente de 0 par contre la variance est élevée. Les corrélations avec les entrées 46 et 52 ne sont pas négligeables.

On remarque que les résidus sont corrélés, principalement avec les entrées 46 et 52.

3.3 Modèles de la famille PEM

Les résidus n'étant pas tout à fait blancs, nous avons tenté d'utiliser la fonction plus générale de type PEM (méthode de l'erreur de prédiction) :

$$A(q)S(t) = \frac{B(q)}{F(q)} E(t-nk) + \frac{C(q)}{D(q)} \delta(t)$$

A, B, E, S et δ ont les mêmes significations que dans le cas du modèle ARX, C est une matrice fonction de q (l'opérateur décalage). Cette méthode procède par itération en vue de minimiser l'erreur de prédiction δ . Les polynômes A, B, C, D, F sont d'ordres respectifs n_A , n_B , n_C , n_D , n_F .

Tous les paramètres ont été testés :

- $nf = nd = 0$, modèle ARMAX,
- $na = nc = nd = 0$, modèle OE (Output Error),
- étude sur le paramètre nd .

Pour notre processus, ces modèles ne sont pas meilleurs que ARX puisque les paramètres supplémentaires ne sont pas significativement différents de 0 et ne diminuent quasiment pas la fonction perte. Ces résultats ont été validés sur plusieurs séries de données.

3.4 Modèle utilisant la théorie des réseaux neuronaux

3.4.1 Rappels

Par ailleurs, une autre équipe du laboratoire s'intéressant aux réseaux neuronaux [Theilliol

& al. 92], nous avons été amenés à utiliser leurs outils.

Comme leur nom l'indique, les réseaux neuronaux artificiels sont basés sur les concepts des systèmes neuronaux biologiques. Les neurones anatomiques sont fortement connectés entre eux et communiquent par l'intermédiaire de neurotransmetteurs. Ce comportement a été modélisé informatiquement et chaque élément est considéré comme un processeur parallèle individuel.

Les réseaux neuronaux offrent la particularité d'extraire une loi à partir d'une série de données et de pouvoir ensuite considérer cette loi comme une loi générale donc de pouvoir servir à modéliser un processus. L'opération de base d'un neurone et de déterminer sa valeur d'activation à partir de ses entrées et d'envoyer cette valeur à ses sorties [Villareal & al. 89].

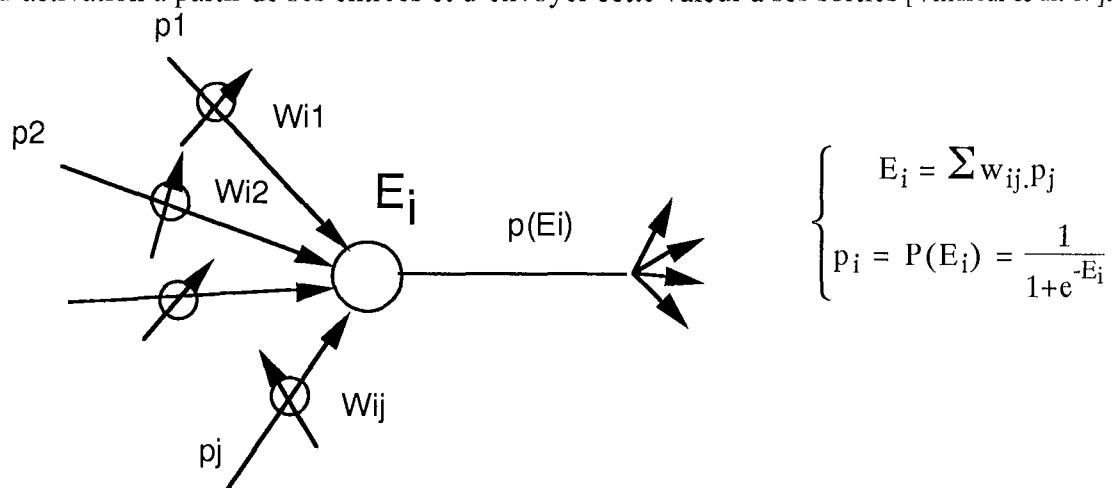


Figure 3.4.1 Schéma d'un neurone

Cette figure montre le schéma d'un élément. Il s'agit d'un élément i qui a j entrées et un nombre indéfini de sorties. Chaque connexion a une valeur associée appelée le poids. À la sortie de l'élément, la valeur $p(E_i)$ est déterminée conformément aux formules ci-dessus. Chaque élément est fonction uniquement des éléments situés en amont.

Durant la phase d'apprentissage sur une série de données, les poids sont tout d'abord attribués aléatoirement. À chaque itération, les poids sont ajustés pour minimiser l'erreur au sens des moindres carrés.

3.4.2 Le modèle

Le modèle qui a été utilisé a été établi par la méthode de rétro-propagation ("backpropagation"). Il a les caractéristiques suivantes pour deux couches de cinq neurones chacune :

Première couche	Seconde couche
$\begin{pmatrix} 1,4505 & 12,9334 & -15,8769 & 13,1750 & -14,9204 \\ 0,3228 & 11,4630 & 24,6135 & -15,2395 & -10,0524 \\ 0,5113 & 8,7325 & -38,8465 & 26,9802 & -12,1216 \\ 3,2302 & 6,2718 & -14,6082 & 6,2166 & -2,2274 \\ 1,1656 & -13,8801 & 6,2771 & -4,1687 & 11,0652 \\ -10,2659 & -10,6723 & 46,9903 & -29,7321 & 15,3655 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 1,2011 \\ 0,8492 \\ 1,1059 \\ 1,4202 \\ 0,7875 \end{pmatrix}$

Ce modèle est un modèle non linéaire dynamique.

Pour la courbe ci-dessous, en abscisse se trouvent les numéros de cycle, en ordonnée les nombres de véhicules estimés (traits pleins) et réels (traits pointillés) sur la sortie 5.

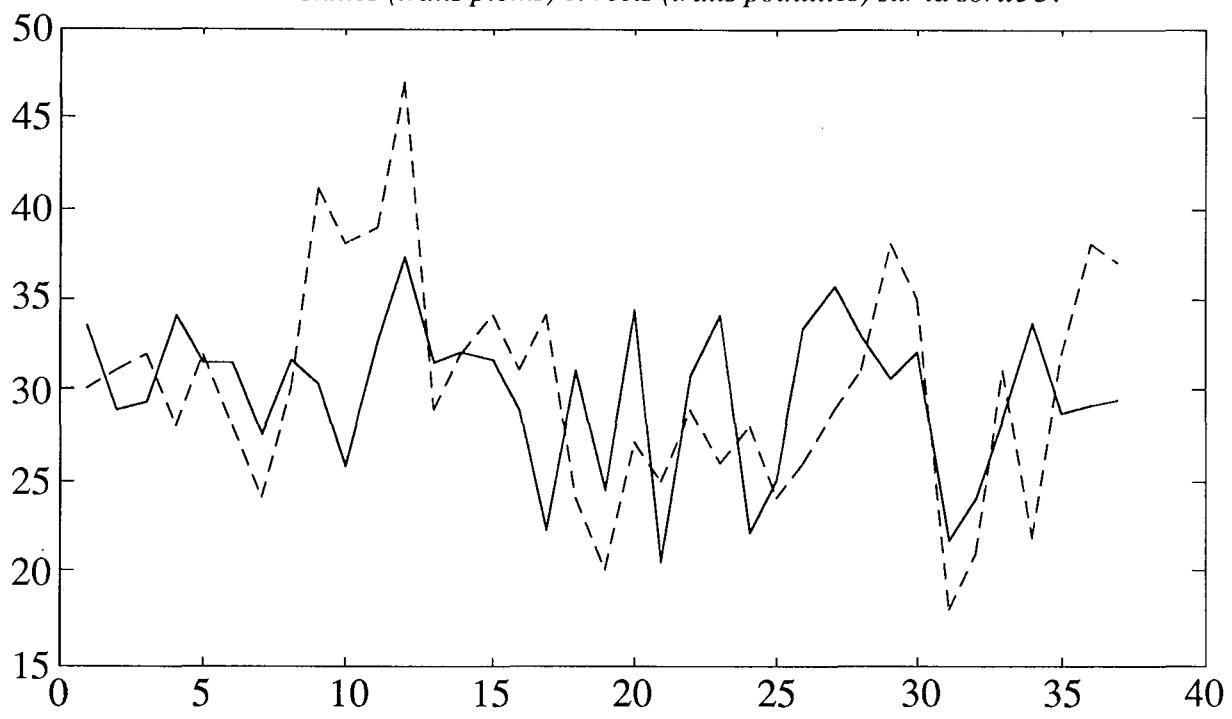


Figure 3.4.2 Modèle neuronal

Les caractéristiques des résidus entre valeurs données par le modèle et valeurs mesurées sont les suivantes :

moyenne	variance	coeff corr avec entrée 46	coeff corr avec entrée 51	coeff corr avec entrée 52
-0,47	37,7	0,28	-0,1	0,18

La variance est élevée. On peut observer une faible corrélation avec les entrées 46 et 52.

4. Comparaison des modèles

Nous avons testé et comparé ces différents modèles sur plusieurs campagnes d'acquisition. Nous présentons ici les résultats sur deux campagnes significatives. L'apprentissage s'est effectué sur deux séries, une série dite SP (acquise le mardi 12 septembre 1991 de 12H00 à 18H00) et une dite TX (acquise le vendredi 18 septembre 1992 de 8H45 à 13H45).

Nous proposons ci-dessous le tableau des résultats pour des données acquises le mercredi 6 novembre 1991 de 8H14 à 9H14.

	Moyenne des résidus	Ecart-type des résidus	Somme des carrés des écarts
Modèle de connaissance	0,600	5,764	1209,5
ARX, série SP	0,373	5,555	1114,3
ARX, série TX	0,404	5,814	1222,8
Pas à pas, série SP	0,260	5,456	1074,3
Pas à pas, série TX	0,449	5,511	1101
Neurones, série SP	0,181	5,728	1182,5
Neurones, série TX	0,139	5,677	1160,9

Sur cette série de données, les réseaux neuronaux sont meilleurs pour ce qui est de la moyenne, tandis que tous les modèles se valent à peu près en terme d'écart. Tant en ce qui concerne la moyenne que la variance, nous notons que l'apprentissage sur la série de données SP donne de meilleurs résultats que la série TX, hormis pour le modèle neuronal.

Voici les résultats pour une série de données acquise le jeudi 17 septembre 1992 de 13H45 à 14H45.

	Moyenne des résidus	Ecart-type des résidus	Somme des carrés des écarts
Modèle de connaissance	0,811	4,578	778,76
ARX, série SP	0,379	6,036	1316,95
ARX, série TX	0,390	5,901	1259,3
Pas à pas, série SP	0,378	6,237	1405,9
Pas à pas, série TX	0,410	6,08	1336,8

Neurones, série SP	0,468	6,14	1365,09
Neurones, série TX	-0,110	6,737	1634,5

Si nous nous référons à la moyenne, le réseau neuronal appris avec la série TX est le meilleur modèle, tandis que le modèle de connaissance est le plus éloigné de 0. En terme d'écart, le modèle de connaissance est ici bien meilleur puisque sa variance vaut à peu près 75 % de la variance moyenne de tous les autres modèles.

Il est intéressant de noter que la série SP (12/9/91) modélise mieux le 6/11/91 sauf en ce qui concerne les réseaux neuronaux, tandis que la série TX (18/9/92) modélise mieux le 17/9/92. Cela voudrait dire que le modèle se dégrade en fonction du temps et qu'il faut par conséquent effectuer de temps à autre des apprentissages pour avoir des modèles à jour.

On peut noter que les résidus de ces modèles ont une variance assez élevée (environ 35), la moyenne peut être considérée comme nulle (moins d'une demi-voiture). Ces résidus sont en général un peu corrélé avec les entrées 46 et 52, ils sont donc "colorés".

5. Conclusion

Les modèles testés dans ce chapitre ne donnent pas des résultats significativement différents, bien que le modèle de connaissance semble meilleur dans certains cas. L'intérêt du modèle de connaissance reste que les valeurs qu'il donne peuvent être interprétées en raisonnant physiquement. Le modèle de connaissance et le modèle ARX sont capables de s'adapter à tout état de trafic, nous avons eu l'occasion de les tester sur des trafics de nuit et ils donnent des valeurs cohérentes. La régression multiple et les réseaux neuronaux nécessitent une démarche multi-modèle, avec apprentissage sur des données différentes en fonction des trafics à analyser.

De toute manière, ces modèles présentent une insuffisance majeure, comme c'est souvent le cas pour les modèles utilisés en régulation de trafic. Cette insuffisance est due au fait que les variables macroscopiques utilisées (débit¹⁸ et taux d'occupation) intègrent des phénomènes différents ce qui se traduit par l'impression accentuée d'un processus imprévisible. De plus, même si ces modèles nous permettent dans le meilleur des cas de détecter, voire de localiser une anomalie, il ne faut pas espérer de cette manière ni les analyser ni les classer et ne pas prétendre non plus avoir une réaction rapide ("temps réel") de l'algorithme de détection dans la mesure où il est nécessaire d'attendre la fin de cycles et de comparer des cycles entre eux pour la détection.

C'est pourquoi dans le chapitre suivant nous déconvoluerons ces phénomènes. Nous sommes revenus à des variables plus microscopiques et avons analysé le trafic à travers la fenêtre stroboscopique introduite précédemment {Chap. 4 § 5}.

¹⁸Nombre de véhicules par unité de temps

Chapitre 6 - Détection par observation de paramètres

1. Introduction

Arrivés à ce niveau, nous nous sommes interrogés sur l'intérêt de développer un algorithme qui nous permette de surveiller la boucle magnétique pour que celle-ci puisse donner directement une information validée concernant les erreurs éventuelles de capteurs et déterminer certaines situations "inhabituelles"*. Pour cela, il nous semble important de revenir sur la définition d'une boucle "améliorée" {chap.3 §4.2} vue auparavant et de considérer celle-ci comme une hypothèse de base de travail. De plus, nous avons vu dans le chapitre précédent qu'il était difficile de satisfaire aux critères du temps réel et de l'analyse d'anomalies en travaillant avec des variables macroscopiques.

Cet algorithme est basé sur l'étude précise du signal microscopique émis par la boucle, complété par une comparaison des paramètres macroscopiques aussi bien dans la dimension spatiale (corrélation avec les boucles adjacentes et amont) que temporelle (corrélation avec les cycles précédents).

2. Présentation de l'algorithme

Représenté sous une forme proche de celle d'un GRAFCET, l'algorithme reprend le concept de la fenêtre stroboscopique introduit dans le présent mémoire {chap.4 §5.3}. De cette étude nous pouvons considérer sept phases*, trois durant le temps de vert et quatre durant le temps de rouge (et orange). A la fin de chaque phase une transition permet de passer à la phase suivante.

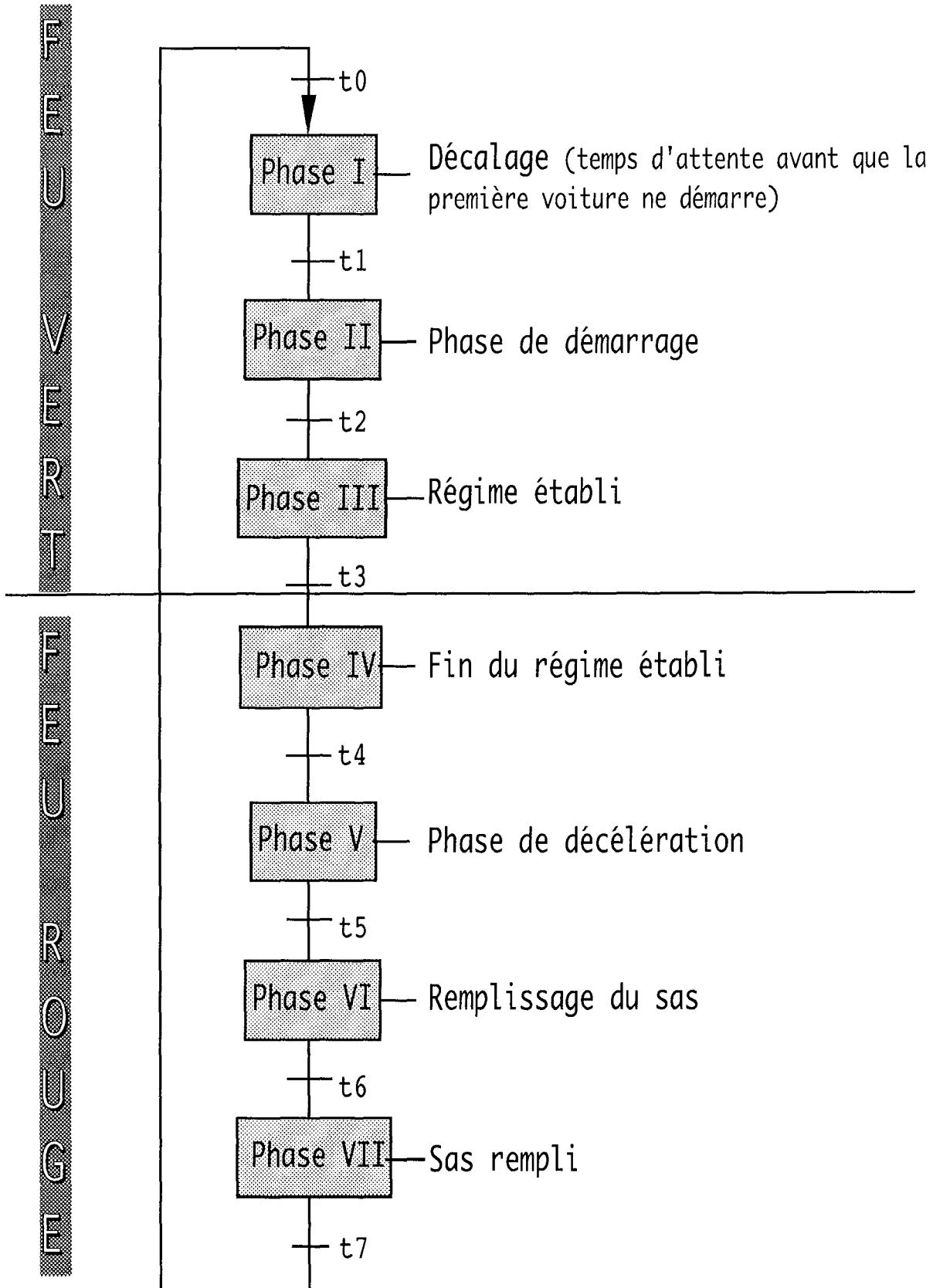


Figure 2.a : Algorithme de supervision

Boucle n°45 12/9/91 de 12H00 à 12H03

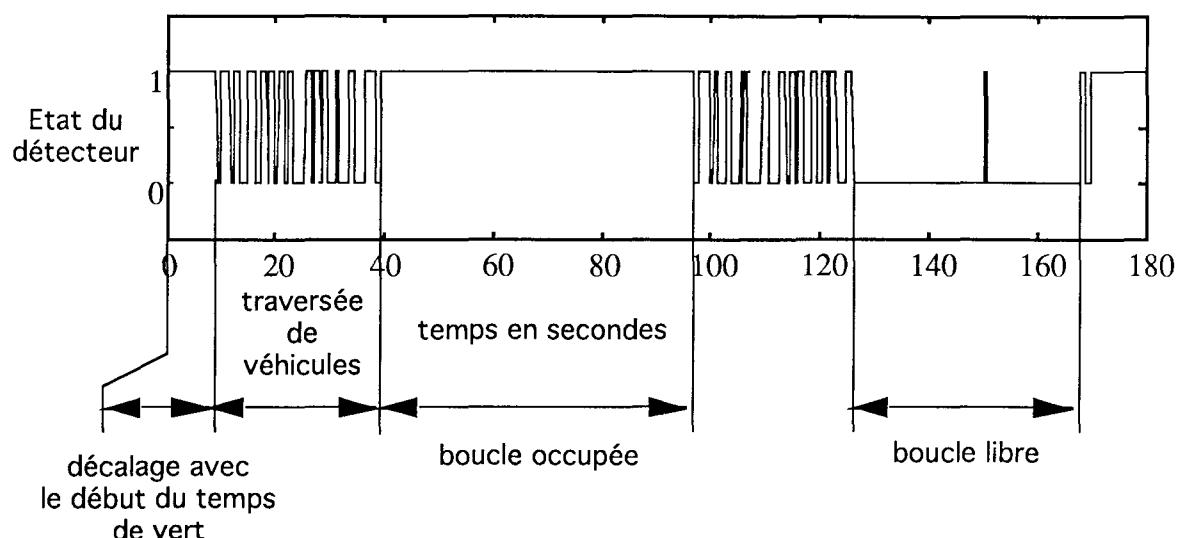


Figure 2.b : Occupation d'une boucle durant trois minutes

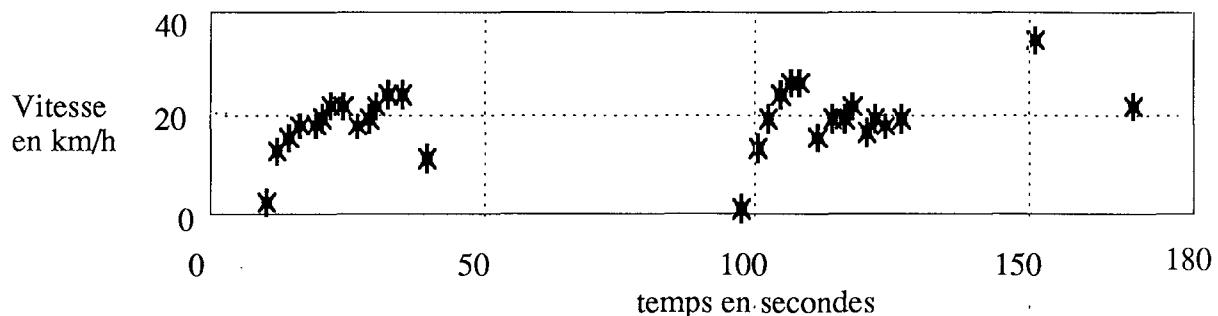


Figure 2.c : Vitesses estimées des véhicules durant trois minutes

Cette figure montre les régimes de trafic déterminés par l'algorithme de supervision pour les deux cycles dont les vitesses sont représentées ci-dessus. Les valeurs données pour chacun des états sont arbitraires. L'important est ici de repérer chacun de ces états de trafic par la valeur qui lui a été attribuée.

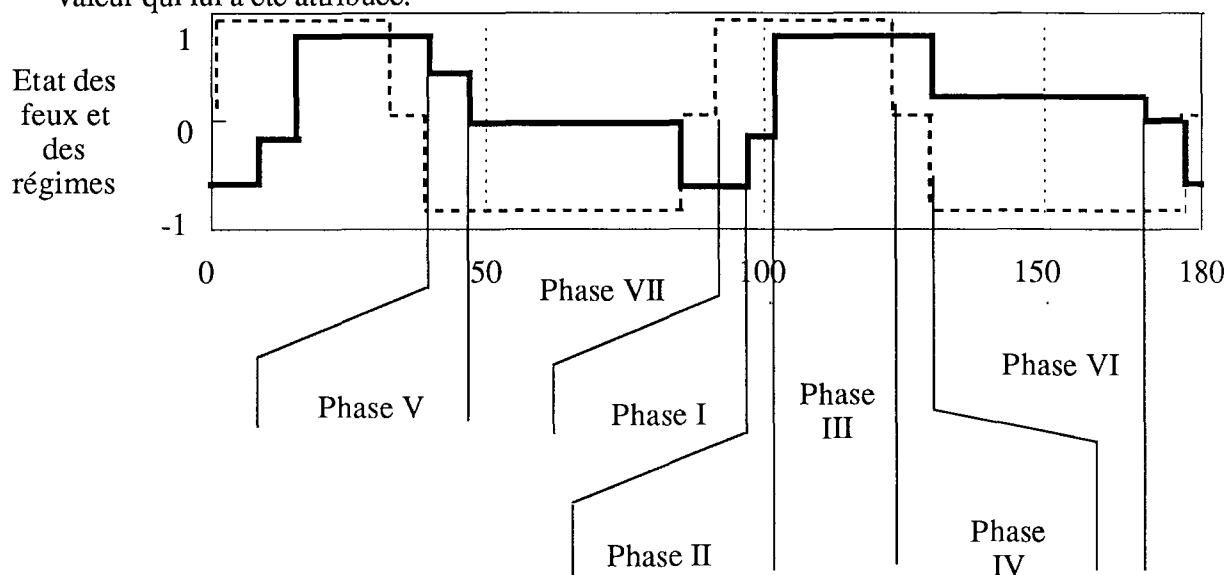


Figure 2.d : Les différents régimes de trafic

$Re = -0,7$: Début de cycle, temps de décalage ;	Phase I
$Re = -0,2$: Phase de démarrage ;	Phase II
$Re = 0,9$: Régime établi ;	Phases III & IV
$Re = 0,7$: décélération.	Phase V
$Re = 0,2$: remplissage du sas.	Phase VI
$Re = 0$: sas rempli.	Phase VII

3. Transitions

Nous allons faire l'étude des transitions décrites dans le schéma ci-dessus :

- t 0) Passage lorsque le feu concerné passe au vert.
- t 1) Franchissement si la boucle est à 0 après le décalage et si un véhicule passe après le temps de décalage.
Si la boucle est à 1, franchissement dès qu'un véhicule quitte la boucle.
- t 2) Dès que la vitesse moyenne en régime établi du cycle précédent est atteinte ou dès qu'un véhicule a une vitesse plus faible que le précédent. Cela signifie que l'on n'est plus en phase d'accélération.
- t 3) Passage du feu concerné au rouge.
- t 4) - Dès qu'un véhicule a une vitesse $< 0,7 * \text{vitesse moyenne en régime établi}$.
- Ou après le décalage dû à la distance entre feu et boucle.
La valeur de 0,7 a été déterminée par l'expérience.
- t 5) Si nous nous apercevons que la vitesse du véhicule ne décroît plus et qu'elle est à nouveau $> 0,7 * \text{vitesse moyenne en régime établi}$.

Nota : en pratique, nous observons qu'il y a en fait dans la plupart des cas une divergence en "ou" entre :

- d'une part la transition t 4 et la phase V,
- d'autre part la transition t 5 et la phase VI.

- t 6) Dès que la boucle reste à 1 suffisamment longtemps (environ 10 secondes pour tenir

compte des véhicules longs).

t_7 ou t_0) Dès que le feu concerné passe au vert.

4. Phases et situations détectables

A tout instant, il est nécessaire de prendre en compte la validité des informations fournies par le capteur [Chap.2 § 4.2] qui se traduit par un maintien trop long à 0 ou à 1 du signal boucle. Nous supposerons dans la suite qu'il n'y a pas de défaut de ce type, nous nous focaliserons donc sur les anomalies de trafic proprement dites.

Nous allons maintenant décrire le type de situations détectables par phase :

Les phases

I) DECALAGE

Attente après le début de vert que le véhicule qui est sur la boucle la quitte.

Situations détectables par phase

Si le taux d'occupation = 1 => circulation dense.

Si l'occupation $<> 0$ et $<> 1$ => ce cas signifie que pendant le décalage, un ou plusieurs véhicules sont passés sur la boucle mais ne sont pas restés dessus.

Si l'occupation = 0 => la circulation est relativement fluide car le sas n'est pas rempli en fin de cycle.

II) PHASE DE DEMARRAGE

Existe si l'occupation = 1 à la fin du décalage, sinon facultative.

Si l'occupation = 1 à la fin du décalage et que le véhicule ne quitte pas la boucle, nous sommes en présence de la source d'une anomalie de trafic possible accidentelle si seule cette boucle est concernée ou boucle bloquée à 1. Si les boucles adjacentes ou aval sont également concernées, c'est dû à une congestion.

Il y a une progression de la vitesse pendant cette phase. Si la durée est trop longue avec passage de véhicules, alors les conditions de circulation ne sont pas bonnes, anomalie accidentelle si seule cette boucle est

III & IV) REGIME ETABLI

Evolution de la vitesse moyenne => A la fin du régime établi, nous obtenons la vitesse moyenne en régime établi.

Les phases III et IV sont en réalité une même phase en terme de comportement des véhicules, seul l'état du feu explique le changement.

V) DECELERATION

VI) REMPLISSAGE DU SAS

VII) SAS REMPLI

A la fin du cycle, calcul du taux d'occupation Tdr en intégrant la partie décalage en début de période.

VIII) VARIABLES MACROSCOPIQUES

- **Comparaison des taux d'occupation** calculés sur la durée du cycle et calculés sur le temps de vert, avec le décalage* approprié :

1) Le taux d'occupation calculé sur le temps de vert est plus important que le taux d'occupation calculé sur la durée du cycle => la plupart des véhicules arrive sur le

concernée, congestion ou mauvaises conditions de circulation si les boucles adjacentes ou aval sont dans le même cas.

Si la durée est trop longue parce qu'il n'y a pas de véhicule, nous ne pouvons rien conclure.

Etude du temps mis par le véhicule qui est bloqué sur la boucle au feu rouge pour quitter celle-ci après que le feu soit passé au vert (cette notion est encore une fois fonction de la distance boucle-feu).

Etude de la dégradation du carrefour par observation de la dégradation de la vitesse moyenne mesurée pendant la période de régime établi.

Il y a en effet une corrélation directe entre la vitesse moyenne en régime établi et la fluidité du carrefour. Etant donné notre manière de calculer la vitesse, nous ne pouvons tenir compte que de la vitesse moyenne calculée sur plusieurs véhicules.

En phase de ralentissement ou de remplissage de sas, nous pouvons avoir une idée de la fluidité du trafic en mesurant le temps mis pour remplir le sas ou en mesurant le taux d'occupation pendant ce temps.

si les phases V et VI sont courtes => circulation dense.

carrefour pendant le temps de vert, donc le trafic est suffisamment fluide et la coordination (onde verte) entre carrefours est correcte.

2) Dans l'autre cas, beaucoup de véhicules arrivent pendant le temps de orange/rouge et ne peuvent aisément quitter le carrefour, cela signifie que la coordination n'est pas bonne, ce qui peut résulter d'une anomalie.

Si tout est à 0 => vérifier en fonction de l'heure si ce n'est pas un problème de transmission.

Si l'occupation = 1 ou 0 pendant tout un cycle => faire équilibrage de bilan ou étudier les rapports moyens boucle / total.

Si les véhicules qui ne passent sur la boucle où il y a 0 passent sur les boucles adjacentes :

si oui, il s'agit d'une anomalie de trafic,
si non, c'est une erreur boucle.

5. Utilisation de l'algorithme

Dans l'état actuel de développement, cet algorithme nous donne la possibilité de suivre en temps réel l'évolution des signaux émis par les boucles. On peut l'envisager comme prolongement d'un capteur intelligent, ou même comme formant la partie logicielle de celui-ci.

Dans l'hypothèse de non défaut capteur ou de non défaut de transmission, il peut nous donner très précisément et en temps réel (quasiment à la seconde) l'état de fluidité du trafic. En comparant cet état de fluidité et ses évolutions sur deux capteurs consécutifs, il est aisément de localiser la cause d'une anomalie. Le début de l'anomalie sera connu précisément. Etant donné que l'évolution du trafic reste connue en temps réel, il est possible de voir si cette anomalie se résorbe rapidement (voiture qui tarde à démarrer), auquel cas il ne faut pas en tenir compte, ou si l'anomalie tarde à se résorber.

L'algorithme de supervision peut également détecter le mauvais fonctionnement d'un capteur mais seulement à l'issue d'un délai nécessaire à la validation de cette information (de l'ordre du cycle de feu).

Mise en œuvre pratique

Il est nécessaire dans un premier temps de tester et de valider l'algorithme en temps réel. Une fois l'algorithme installé, il ne devrait plus nécessiter d'intervention humaine puisqu'il se suffit à lui-même.

Utilisation de l'algorithme dans d'autres domaines que la régulation de trafic

Cet algorithme ou des variantes de celui-ci pourraient être adaptés à d'autres signaux du même type, c'est-à-dire des signaux répétitifs pour lesquels on retrouve périodiquement une forme similaire. L'intérêt de l'algorithme étant de permettre la localisation du début et de la fin d'une perturbation.

6. Conclusion

Cet algorithme de supervision pour boucles magnétiques “intelligentes” est le résultat d'une démarche déductive plutôt que statistique. Cet algorithme présente l'intérêt de pouvoir s'adapter à d'autres capteurs.

L'inconvénient majeur de cet algorithme est qu'il nécessite une certaine instrumentation de la zone à surveiller et qu'il sera plus précis si le nombre de capteurs sur lesquels il se base est plus important. On peut considérer que ceci n'est pas une contrainte grave si l'on décide de n'instrumenter que les zones sensibles.

Le principal avantage de cet algorithme est qu'il permet de faire une analyse précise des comportements de trafic à chaque instant. De ce point de vue, la contrainte du temps réel est respectée. Par cette méthode, il est possible de situer le début et la fin d'une anomalie.

Cet algorithme a été testé en simulation et donne de bons résultats en ce qui concerne la détection et l'analyse de situations d'anomalies.

Références bibliographiques de la seconde partie

- [Aron & al. 90] M. Aron, B. Ferry - Le guidage des véhicules : une direction à suivre... ou un détour de la technique ? - *Recherche Transports Sécurité* "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.79-87.
- [Beaumelle & al. 88] J.M. Beaumelle, L. Massabo et D. Lévy - Nice à la croisée des II^e et III^e millénaires, une politique des déplacements - *Transport Environnement Circulation*, n° 88, juin 1988, pp. 32-40.
- [Bell & al. 91] M.C. Bell, G. Scemama & L.J. Ibbetson - CLAIRE : an expert system for congestion management - *Advanced Telematics in Road Transport*, Bruxelles, février 1991, pp.596-614.
- [Bergeret 91] J. Bergeret - Ordre et désordre mental - *La Recherche* n°232, 1991, pp.674-681.
- [Blosseville & al. 90] J.M. Blosseville, F. Lenoir, V. Motika, S. Espié, Y. Chen - Traitement d'images : recherches menées au département analyse et régulation de trafic - *Recherche Transports Sécurité* "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.57-65.
- [Blosseville & al. 91] J.M. Blosseville, S. Sellam, S. Guillen, V. Motika, F. Bessaguet - Automatic incident detection using computer vision techniques - *Conférence DRIVE Bruxelles*, 1991, pp. 714-739.
- [Bouzar & al. 90] S. Bouzar, F. Lenoir, M. Gauthier - Une machine de traitement d'image pour la mesure du trafic routier en temps réel - *Recherche Transports Sécurité* "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.65-79.
- [Bretherton & al. 91] R.D. Bretherton, G.T. Bowen - Incident detection and traffic monitoring in urban areas - *DRIVE conference Advanced Telematics in Road Transport*, Bruxelles, février 1991, pp.740-752.
- [Briquet 90] P. Briquet - Grandeur et servitudes de PATRICIA ou la visionique appliquée au trafic routier et urbain - *LCPC* (rapport n° 156), Paris, 1990.
- [Buatois 86] P. Buatois - Rennes : ville plus sûre, quartiers sans accident - *Circulation - signalisation transports* (Ingénieurs des villes de France), n° 326, avril 1986, pp. 17-21.
- [Buxton & al. 91] J.L. Buxton, S.K. Honey, W.E. Suchowerskij, A. Tempelhof - The TravelPilot : a second-generation automotive navigation system - *IEEE transactions on vehicular technology* - vol.40, n°1, février 1991, pp.41-45.
- [Capitaine & al. 87] B. Capitaine, B. Foraste et G. Scemama - Un système expert pour le traitement de la congestion du trafic urbain - *Transport Environnement Circulation*, n° 84/85, décembre 1987, pp. 47-49.
- [Casey 55] H.J. Casey - *Traffic Quarterly*, vol. IX, n° 1, 1955, p. 23.
- [CATAR 90] CATAR 1023 - Document SFIM, 1990, 19 pages.
- [Catling 89] I. Catling - Autoguide - electronic route guidance in the UK - *CCCT'89 IFAC/AFCET*, Paris, septembre 1989, pp.423-430.
- [CETUR 84] Fiche technique n° 4 : Affectation variable des voies de circulation - *CETUR*, Bagneux, 1984, 4 pages.
- [Cohen 86] S. Cohen - Régulation du trafic aux heures de pointe : optimisation et approche locale, le cas d'Aix en Provence - *Transport Environnement Circulation*, n° 77, août 1986, pp. 28-32.
- [Cohen 90] S. Cohen - Ingénierie du trafic routier - *Presses des Ponts et Chaussées*, Paris, 1990, 246 pages.

- [Daganzo 85] C.F. Daganzo - The uniqueness of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck - *Transportation Science*, vol. 19, n°1, 1985, pp.29-37.
- [Danech-Pajouh 86] M. Danech-Pajouh - Estimation des matrices origine-destination par les comptages et la théorie d'information - INRETS (Rapport INRETS n° 7), juin 1986.
- [Dobias 88] G. Dobias - PROMETHEUS : résultats de la première étape de définition - *Recherche Transports Sécurité*, n° 17, 1988, pp.53-54.
- [DRIVE V1056 91] DRIVE V1056 MONICA - Strategies using information from UTC sensors - TRRL, INRETS, SSP, Bruxelles (DRIVE deliverable n°05), 1991, 93 pages.
- [Espié & al. 90] S. Espié, F. Lenoir - L'avenir de la mesure du trafic routier - *Recherche Transports Sécurité* "Spécial Gestion du Trafic" - n° 28, décembre 1990, pp.51-57.
- [Evans 76] S.P. Evans - Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment - *Transportation Research*, vol. 10, 1976, pp. 37-57.
- [Farges & al. 77] R. Farges & M. Gauguet - Sur les modèles probabilistes de prévision des localisations et des déplacements dans une agglomération - *RAIRO*, vol.11, n°3, 1977, pp.281-303.
- [Fletcher 89] P. Fletcher - Easing London's traffic, with the help of Autoguide - *Electronics*, septembre 1989.
- [Florian & al. 75] M. Florian, S. Nguyen & J. Ferland - On the combined distribution-assignment of traffic - *Transportation Science*, vol. 93, 1975, pp.43-45.
- [Foster 87] M. R. Foster - Vehicle location and navigation in the urban environment - *IEE conference publication*, n° 280, 1987, pp. 152-155.
- [Franceries 78] C. Franceries - A Bordeaux : une stratégie originale de régulation du trafic (GERTRUDE) - *Le Moniteur des travaux publics*, n° 110, mars 1978, pp. 87-94.
- [French 88] R. L. French - Le rôle futur du guidage des véhicules pour alléger la congestion du trafic urbain - *Navigation*, vol. 36, n° 144, 1988, pp. 461-470.
- [French 89] R.L. French - Assessment of technologies, institutional barriers, and cooperative programs on dynamic route guidance in the U.S.A. - CCCT'89 IFAC/AFCET, Paris, septembre 1989, pp.403-421.
- [Gartner 80] N.H. Gartner - Optimal traffic assignment with elastic demands : a review. Part II : algorithmic approaches - *Transportation Science*, vol. 14, 1980, pp.192-208.
- [Giuliano 89] G. Giuliano - Incident characteristics, frequency, and duration on a high volume urban freeway - *Transportation Research : Part A*, Vol. 23A, No. 5, 1989, pp. 387-396.
- [Glayre & al. 88] P. Glayre, P.H. Bovy - Nouvelles techniques de régulation des carrefours - *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, département de génie civil, septembre 1988, 88 pages.
- [Gnaedinger 91] E. Gnaedinger - Etudes d'architecture et de services d'application pour un réseau de communication multi-services dédié au Génie Urbain - *Université de Nancy I* (Thèse), Nancy, 1991.
- [Gnaedinger & al. 92] E. Gnaedinger, J.M. Thiriet, M. Robert, G. Bloch, C. Humbert - Traitemet de l'information, réseau industriel et génie urbain - Congrès "l'Automatisation Industrielle", Montréal, 1er au 3 juin 1992.
- [Goodwin 89] P.B. Goodwin - Comprendre la congestion - *Recherche Transports Sécurité*, n° 24, pp. 23-28, décembre 1989, pp.1216-1224.
- [Grassberger 91] P. Grassberger - La percolation ou la géométrie de la contagion - *La Recherche* n°232, 1991, pp.640-647.
- [Hallefjord & al. 86] A. Hallefjord & K. Jörsten - Gravity models with multiple objectives - theory and applications - *Transportation Research Part B*, vol. 20B, n° 1, 1986, pp. 19-39.
- [Hoffmann & al. 90] G. Hoffmann, J. Janko - Travel times as a basic part of the LISB guidance strategy - Conference IEE, "Road Traffic Control", may 1990, pp.6-10.

- [Hunt & al. 85] P. B. Hunt & T. R. Holland - The effect of an incident in a SCOOT system - in simulation and on-street - *Traffic engineering and control*, vol. 26, n° 2, 1985, pp. 55-58.
- [Inigo 89] R. M. Inigo - Application of machine vision to traffic monitoring and control - *IEEE transactions on vehicular technology*, n° 3, août 1989, pp. 112-122.
- [INRETS 88] Les modèles INRETS de simulation - *INRETS* (Synthèse n° 12), Arcueil, 1988, 136 pages.
- [IVF 83a] Panneaux variables d'information routière en milieu urbain - *Transports circulation* (Ingénieurs des villes de France), n° 300, octobre 1983, pp. 31-37.
- [IVF 83b] Parc d'échange voiture - transports collectifs - *Transports circulation* (Ingénieurs des villes de France), n° 300, octobre 1983, pp. 27-30.
- [IVF 86] Trans Val de Marne - Circulation - signalisation transports (Ingénieurs des villes de France), n° 326, avril 1986, pp. 48-49.
- [IVHS 92] Inside IVHS, vol. 2, n°5, 1992.
- [Jörsten 80] K.O. Jörsten - A maximum entropy combined distribution and assignment model solved by Benders decomposition - *Transportation Science*, vol. 12, 1980, pp.262-276.
- [Jouannet 89] J.P. Jouannet - Positionnement automatique de caméras en environnement urbain pour la visualisation des anomalies de trafic - Mémoire CNAM, CNAM, Nancy, 1989, 125 pages.
- [Jouannet & al. 91] J.P. Jouannet, M. Robert, J.J. Davaine - Automatic positioning of cameras in urban environment for visualisation of traffic anomalies - *Vision in vehicles III*, Elsevier, 1991, pp.239-246.
- [Jumarié 82] G. Jumarie - Urban two-lane highway with quasi-dense traffic : analysis, finite element modelling, perturbation method and optimal control - *International journal of systems science*, vol. 13, n° 8, 1982, pp. 819-838.
- [Kessaci 88] A. Kessaci - Estimation en ligne et gestion des capacités pour la commande du trafic urbain - *Thèse ENSAE n°25*, Toulouse, 1988.
- [Kessaci & al. 90] A. Kessaci, J.L. Farges, J.J. Henry - Estimation de pourcentages directionnels à l'aide de capteurs magnétiques et d'information en provenance de systèmes de guidage - *Recherche Transports Sécurité "Spécial Gestion du Trafic"* - n° 28, décembre 1990, pp.39-45.
- [Laskar & al. 91] J. Laskar & C. Froeschlé - Le chaos dans le système solaire - *La Recherche* n°232, 1991, pp.572-583.
- [Laurent 90] J. Laurent - Localisation de véhicules en milieu urbain en temps réel - *CRAN-ESSTIN* (mémoire DEA), Nancy, 1990, 34 pages.
- [Leblanc & al. 75] L.J. Leblanc, E.K. Morlok & W.P. Pierskalla - An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem - *Transportation Research*, vol. 9, 1975, pp. 309-318.
- [Lemperiere & al. 89] F. Lemperiere, A. Broto, P. Gravost et I. de Maublanc - Pour traiter la circulation parisienne, le LASER remède miracle ou gadget ? - *Tunnelling and underground space technology*, vol.4, n°3, 1989, pp. 261-278.
- [Lesort 85] J.B. Lesort - Deux exemples d'expérience en vraie grandeur de régulation de la circulation urbaine - *Recherche Transports Sécurité*, n° 5, 1985, pp. 48-50.
- [Lesort] J.B. Lesort - Cours ENTPE : Théorie du trafic - Non publié, 48 pages.
- [Lindley 87] J. A. Lindley - Urban freeway congestion : quantification of the problem and effectiveness of potential solutions - *ITE journal*, vol. 57, n° 1, 1987, pp. 27-32.
- [Ljung 87] Ljung L - System Identification : Theory for the user - Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1987.
- [Loffler & al. 90] C. Loffler, F. Vergez, J. Ragot, J.-J. Davaine - Détection, comptage et reconnaissance de

- véhicules au moyen d'un capteur de détection de vibrations - *Rencontre Nationale du Génie Urbain, Lyon, 29-30 mars 1990.*
- [LPC 90] Le matériel LPC - *LCPC, Paris, 1990, 71 pages.*
- [Mansuy & al. 87] P. Mansuy, S. Besnard - Câble piézoélectrique - Nouvelle d'information *SETRA*, mars 1987, 4 pages.
- [Marcillon 86] F. Marcillon - L'ingénieur de trafic et le P.D.U. : le cas de Nice - *Circulation - signalisation transports* (Ingénieurs des villes de France), n° 326, avril 1986, pp. 12-14.
- [Mason & al. 92] J.M. Mason, K. Fitzpatrick, D.L. Seneca, T.B. Davinroy - Identification of inappropriate driving behaviors - *Journal of Transportation Engineering*, vol.118, n°2, 1992, pp.281-298].
- [Matlab 88] L. Ljung - System identification toolbox for use with Matlab : user's guide - *The MathWorks Inc.*, avril 1988.
- [Meykuchel & al. 80] G. Meykuchel & M. Heitz - Le système de Strasbourg dix-huit mois après - *Transport Environnement Circulation*, n° 39, mars-avril 1980, pp.30-33.
- [Morin 82] J.M. Morin. - Etude du débit de saturation d'une rue à l'entrée d'un carrefour à feux - *Rapport de l'Institut de Recherche des Transports*, juin 1982.
- [Munoz 81] M. Munoz - Développement des techniques de régulation dynamique en milieu urbain et traitement automatique d'images vidéo - Thèse *INPL*, Nancy, juin 1981, 322 pages.
- [Najim 88] Najim M. - Modélisation & identification en traitement du signal - Masson, Paris, 1988.
- [Nguyen 82] S. Nguyen - Modèles de distribution spatiale tenant compte des itinéraires - *Université de Montréal* (publication #225), Montréal, septembre 1981-novembre 1982, 36 pages.
- [Nicolis 91] C. Nicolis - Le climat peut-il basculer - *La Recherche* n°232, 1991, pp.584-587.
- [Orléan 91] A. Orléan - Les désordres boursiers - *La Recherche* n°232, 1991, pp.668-673.
- [Pretty 88] R.L. Pretty - Road pricing : a solution for Hong Kong ? - *Transportation Research, Part A*, vol.22A, n° 5, 1988, pp.319-327.
- [Prometheus 91] PROMETHEUS - 1991, 15 pages.
- [Ragot & al. 90] J. Ragot, M. Darouach, D. Maquin, G. Bloch - Validation de données et diagnostic - *Hermès, Paris*, 1990, 431 pages.
- [Rathi 88] A. K. Rathi - A control scheme for high traffic density sectors - *Transportation Research Part B*, vol. 22, n° 2, 1988, pp.81-101.
- [Ritchie 90] S. G. Ritchie - A knowledge-based decision support architecture for advanced traffic management - *Transportation Research, Part A*, vol. 24, n° 1, 1990, pp. 27-37.
- [Robert & al. 90] M. Robert, J.M. Thiriet, J.P. Jouannet, J.J. Davaine - Positionnement automatique de caméras en environnement urbain pour la visualisation et l'analyse des anomalies du trafic - *Rencontre Nationale du Génie Urbain, Lyon, 29-30 mars 1990.*
- [Robertson & al. 82] D. I. Robertson & P. B. Hunt - A method of estimating the benefits of co-ordinating signals by Transyt and Scoot - *Traffic engineering and control*, vol. 23, n° 11, 1982, pp. 527-531.
- [Robillard 75] P. Robillard - Estimating the O-D matrix from observed link volumes - *Transportation Research*, vol. 9, 1975, pp.123-128.
- [Roth 91] S. Roth - Validation d'un modèle d'analyse de trafic - *ESSTIN* (mémoire DEA), Nancy, 1991, 64 pages.
- [Roth 91] S. Roth - Modèles de simulation de trafic urbain et autoroutier - *ESSTIN* (rapport bibliographique DEA), Nancy, 1991, 30 pages.
- [Rumelhart & al. 86] D.E. Rumelhart & J.L. McClelland - Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition - *MIT Press*, Cambridge, Massachusetts, 1986.

- [Sanchez & al. 86] M. Sanchez & M. Brunetti - Mise en place d'une banque de données informatisée portant sur l'offre publique et privée de stationnement à Metz - *Circulation - signalisation transports* (Ingénieurs des villes de France), n° 326, avril 1986, pp. 42-43.
- [Scemama 89] G. Scemama - Réalisation d'un système à base de connaissances pour la gestion du trafic urbain (SAGE) - *Recherche Transports Sécurité*, n° 22, juin 1989, pp. 65-74.
- [Sellam & al. 90] S. Sellam, A. Boulmakoul - Carrefour intelligent : un système de surveillance et de contrôle des carrefours urbains - *Recherche Transports Sécurité "Spécial Gestion du Trafic"* - n° 28, décembre 1990, pp.45-51.
- [SFIM 90] Consignes générales de pose et réalisation des capteurs à boucle en chaussée connectés à un détecteur électronique type SFIM - Document SFIM, 1990, 15 pages.
- [Sibille 90] Sibille P. - Analyses de la mise en œuvre de méthodes d'estimation paramétrique - Thèse de l'Université de Nancy I, 1990.
- [SIEMENS 90] DéTECTEURS SDA/MDA - 1990.
- [Sikobar & al. 81] P.K. Sikobar & B.G. Hutchinson - Empirical studies of work trip distribution models - *Transportation Research Part A*, vol. 15A, 1981, pp.233-243.
- [Smith 84] M.J. Smith - The existence of a time-dependent equilibrium distribution of arrivals at a single bottleneck - *Transportation Science*, vol. 18, n°4, 1984, pp.385-394.
- [Soeur 91] R. Soeur - Boucle magnétique SEREL - SEREL, 1991, 7 pages.
- [Stove 91] A.G. Stove - Obstacle detection radar for cars - *Electronic and Communication Engineering Journal*, october 1991, pp.232-240.
- [Tamin & al. 90] O. Z. Tamin & L. G. Willumsen - Transport demand model estimation from traffic counts - *Transportation*, vol. 16, n° 1, 1990, pp. 3-26.
- [Taylor 90] M. A. P. Taylor - Knowledge-based systems for transport network analysis : a fifth generation perspective on transport network problems - *Transportation Research, Part A*, vol. 24, n° 1, 1990, pp. 3-14.
- [Texier & al. 82] P. Y. Texier & al. - Traitemet de la saturation - CETUR, Bagneux, 1982, 125 pages.
- [Theilliol & al. 92] D. Theilliol, I. Mairet, M. Robert, C. Aubrun, H. Noura - Détection et classification de défauts capteurs dans une boucle de régulation via les réseaux de neurones - Congrès "l'Automatisation Industrielle", Montréal, 1er au 3 juin 1992.
- [Thiriet 91, 92] Thiriet J.-M. - Rapports de contrat CRAN - Ville de Nancy, états d'avancement des travaux - 3 rapports (octobre 1991, février 1992, octobre 1992), 40 pages chacun environ.
- [Thiriet & al. 92] Thiriet J.-M., Robert M., Jouannet J.-P., Humbert C., Davaïne J.-J. - Parameters for modelisation and fault detection at a crossroad - 25th ISATA multiconferences "Road Transport Informatics / Intelligent Vehicle Highway Systems", Florence, 1er au 5 juin 1992.
- [Thuiller 91] P. Thuiller - La revanche du dieu chao - *La Recherche*, n°232, 1991, pp.512-553.
- [Toint 91] P. Toint - La modélisation du transport - *La Recherche*, n°235, 1991, pp.1026,1034.
- [TRRL] Urban Traffic Control - Roads and Traffic in Urban Areas , TRRL, pp. 159-170.
- [Tsuji & al. 85] H. Tsuji, R. Takahashi, H. Kawashima, Y. Yamamoto - A stochastic approach for estimating the effectiveness of a route guidance system and its related parameters - *Transportation Science*, vol. 19, n°4, 1985, pp.333-351.
- [Tyburski 89] R. M. Tyburski - A review of road sensor technology for monitoring vehicle traffic - *ITE journal*, vol. 59, n° 8, 1989, pp. 27-30.
- [UITP 87] UITP REVUE : lutte contre la congestion dans les centres ville - 47ème congrès UITP,

- Lausanne*, 1987, 45 pages.
- [Uliisse 89] Uliisse (Lyon) - Revue de l'Institut National du Génie Urbain, n° 5, décembre 1989, p.4.
- [van Aerde & al. 90] M.W. van Aerde & S. Yagar - Combining traffic management and driver information in integrated traffic networks - Conference IEE, "Road Traffic Control", may 1990, pp.11-15.
- [von Tomkewitsch] R. von Tomkewitsch - Dynamic route guidance and interactive transport management with infrared beacons - IEEE, 19 pages.
- [Villareal & al. 89] J. Villareal & P. Baffes - Sunspot prediction using neural networks - 3rd annual workshop on space operations automation and robotics, july 1989, (NASA conference publication 3059).
- [Westbrook 89] Westbrook M.H. - Future developments in automotive sensors and their systems - *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, vol. 22, 1989, pp.693-699.
- [Wills 86] M.J. Wills - A flexible gravity-opportunities model for trip distribution - *Transportation Research Part B*, vol. 20B, n° 2, 1986, pp.89-111.
- [Willumsen 81] L.G. Willumsen - Simplified transport models based on traffic counts - *Transportation*, vol. 10, 1981, pp.257-278.
- [Vythoulkas 90] Vythoulkas P.C. - A dynamic stochastic assignment model for the analysis of general networks - *Transportation Research Part B*, Vol 24B, n° 6, 1990, pp.453-469.
- [Young 89] W. Young - Application of VADAS to complex traffic environments - *Journal of transportation Engineering*, vol. 115, n° 5, septembre 1989, pp. 521-536.

Conclusion, perspectives et remarques sur l'intégration des modèles élaborés précédemment dans une stratégie de régulation

Dans la première partie du présent mémoire, nous avons effectué une analyse de l'état actuel de l'art en régulation de trafic urbain. Cela nous a permis de voir que la plupart des systèmes utilisés dans le monde sont basés sur des stratégies assez simples. Quelques stratégies plus sophistiquées existent mais sont encore en phase de recherche.

Le fait que les stratégies utilisées sont assez simples s'expliquent par trois raisons :

- L'insuffisance des moyens informatiques jusqu'à une date récente empêchait le développement de stratégies temps réel performantes.
- Le comportement imprévisible des usagers entraîne un bruitage considérable de la plupart des modèles et empêche la mise en œuvre significative de stratégies fines.
- Les lacunes d'instrumentation assez habituelles des systèmes de régulation, pour des raisons essentiellement budgétaires, ne fournissent à l'ordinateur qu'une vue grossière de la circulation.

Par conséquent, nous pensons qu'il est dans un premier temps difficile d'améliorer considérablement la circulation par le biais d'une amélioration de la régulation, tout au moins globalement. Par contre, si une stratégie traditionnelle est suffisamment performante dans la plupart des cas, on pourrait envisager la mise en place d'une stratégie plus fine dans les zones sensibles, en instrumentant celles-ci par des capteurs intelligents.

Dans un second temps, nous pensons que l'avenir va vers l'intégration des systèmes de régulation, de guidage et de localisation pour une plus grande souplesse des déplacements. Nous pouvons penser que ce système intégré pourra également prendre en compte le pilotage des véhicules.

Dans la seconde partie de ce document, nous avons tout d'abord fait un tour d'horizon des capteurs utilisés par les systèmes de régulation. Ceci nous a permis d'avoir une idée de l'existant et de situer l'instrumentation du système nancéien par rapport à ce qui se fait ailleurs ou pourrait exister.

Une typologie des anomalies de trafic, des défauts de capteurs et de tout ce que nous avons appelé situations inhabituelles* de trafic est proposée. Nous avons vu qu'il est très difficile de distinguer ces causes différentes quant à l'observation que nous pouvons en faire par l'intermédiaire des signaux issus des capteurs de trafic et que nous devons par conséquent nous contenter de reconnaître des grandes classes de situations.

Nous avons comparé plusieurs types de modèles et nous avons montré qu'il était difficile

de prétendre classer les anomalies et de les détecter suffisamment tôt à partir des variables macroscopiques TO et NV puisque celles-ci intègrent plusieurs phénomènes différents.

Nous avons donc proposé une fenêtre stroboscopique à travers laquelle nous analysons le trafic. Cette fenêtre stroboscopique permet d'observer l'évolution des états de trafic en fonction des cycles et des phases des feux. A chaque instant, nous pouvons savoir quel est l'état du trafic réel et comparer celui-ci à un état typique dans la phase considérée. Nous avons traduit cette méthode sous forme d'un algorithme qui pourrait être adapté à différents types de capteurs.

Perspectives

Pour ce qui est des perspectives, nous pouvons envisager diverses directions de recherche :

- la modélisation, tester divers types de modèles, particulièrement les modèles chaotiques, pour essayer de modéliser la saturation,
- les capteurs, développer une plate-forme pour la validation des informations capteurs qui tiennent compte des anomalies de trafic, dans une optique "capteurs intelligents",
- les stratégies, développer une stratégie en supposant que le système soit mieux instrumenté et en envisageant l'intégration des fonctions de régulation, de guidage et de localisation,
- enfin, il serait pour nous intéressant de pouvoir tester notre algorithme de supervision en temps réel sur des situations réelles dans l'objectif d'estimer de façon précise les taux de détection et de fausses alarmes.

Intégration des modèles dans une stratégie de régulation de trafic

Nous avons trouvé des moyens de détecter et d'analyser des types de situations inhabituelles (anomalies de trafic, défauts capteur, etc ...) qui peuvent être rencontrées lorsqu'on étudie le trafic sur une zone. Ceci est une première étape mais il est tout de même intéressant de se demander ensuite comment la détection et la caractérisation d'une anomalie peuvent se traduire au niveau de la stratégie utilisée par le système de régulation.

Deux approches complémentaires peuvent être envisagées :

- l'intégration de l'anomalie pour modifier la stratégie elle-même,
- la mise en œuvre d'un algorithme spécifique de traitement de l'anomalie détectée et reconnue.

Intégration de l'anomalie pour modifier la stratégie du système de régulation

Si les trois conditions suivantes sont vérifiées :

- l'anomalie est détectée,
- cette anomalie est ou sera une perturbation de longue durée,
- cette anomalie est localisée.

Alors : le débit maximal possible à l'endroit où se manifeste l'anomalie est réduit.

Par conséquent : la stratégie de régulation devra s'adapter pour tenir compte de cette modification temporaire de la voirie. Les moyens possibles sont les suivants :

- augmentation de la durée du vert sur la voie altérée,
- modification de l'onde verte,
- adaptation véritable de la stratégie (cas d'une stratégie temps réel),
- non utilisation du capteur défaillant dans les prises de mesure. Les mesures manquantes pourront être remplacées par les résultats d'un modèle de comportement en fonction des capteurs amont, aval et adjacents.

Mise en œuvre d'une stratégie spécifique de traitement de l'anomalie détectée et reconnue

Si les conditions suivantes sont vérifiées :

- détection d'une anomalie ;
- reconnaissance de cette anomalie.

Alors éliminer le plus rapidement possible les causes de cette anomalie.

Comment ? par le traitement particulier de celles-ci :

- message demandant l'évacuation d'un véhicule mal arrêté, soit par haut-parleur soit par message radio dans le véhicule,
 - envoi de la maréchaussée sur le lieu de l'incident,
 - envoi des techniciens pour dépanner l'armoire de carrefour ou toute autre source de défauts de capteurs.

Annexe A - Les systèmes de Nancy, Paris, Bordeaux et PRODYN

1. Introduction

Nous allons ici voir plus en détail les systèmes de régulation de Nancy, Paris et Bordeaux qui représentent les trois principaux constructeurs présents sur le marché français (respectivement Siemens, CGA* et GERTRUDE*). Nous verrons ensuite le système PRODYN qui est un algorithme temps réel actuellement en cours de développement sur la Z.E.L.T. (Zone Expérimentale Laboratoire de Toulouse) dans le cadre d'un programme européen D.R.I.V.E. (Dedicated Road Infrastructure for Vehicle Safety in Europe).

 : les références bibliographiques relatives à cette annexe sont détaillées dans la liste des références bibliographiques de la première partie.

2. Système de Nancy

2.1 Présentation

La ville de Nancy compte 100 000 habitants dans une agglomération de 250 000 personnes. Le système de régulation utilisé à Nancy est un système développé par Siemens qui est installé sur la ville proprement dite depuis 1973 et qui a été modernisé en 1980. Ce système gère à Nancy 146 carrefours (sur un total de 160 à Nancy-ville) à l'aide de 120 boucles magnétiques. Les autres carrefours, gérés par le District de l'Agglomération Nancéienne ainsi que quelques carrefours de la ville, utilisent en général une micro-régulation locale sauf 40 carrefours en banlieue qui sont coordonnés par un autre système.

Une vingtaine de caméras sont utilisées sur les points stratégiques pour l'observation du trafic par les opérateurs du poste central. Ces caméras permettent de visualiser les anomalies en cas de saturation.

En période fluide, la ville de Nancy a préconisé la calibration des feux sur une onde verte, tandis qu'à l'heure de pointe elle pratique la rétention sur les pénétrantes pour maintenir la fluidité en centre ville.

2.2 Stratégie du système Siemens à Nancy

Ce système utilise une stratégie de premier type tel que nous les définissons dans le paragraphe sur les types de stratégies de régulation. Le choix des plans de feux¹⁹ dans la bibliothèque prédefinie se fait par la méthode des seuils ou par celle des choix horaires (par exemple aux heures de sortie des écoles).

Ce type de système peut avoir une structure hiérarchisée mais dans le cas de Nancy un seul ordinateur fonctionne, il est accompagné d'un ordinateur de secours qui met 90 secondes pour "prendre la main" en cas de défaillance de l'ordinateur principal.

Les boucles magnétiques sont interrogées toutes les 100 millisecondes. Les informations utilisées par le système sont le taux d'occupation et le nombre de véhicules, calculés non pas par boucle mais par point de mesure, ceux-ci pouvant être définis par l'opérateur du poste central mais regroupant en général la ligne de boucles d'une grande artère. Les taux d'occupation sont déterminés sur une période fixe de 90 secondes qui ne correspond pas forcément au cycle réel puisque ceux-ci sont variables (55 secondes la nuit, 70 secondes en période fluide, 90 secondes en période de saturation, quelques variations sont dues aux prolongations ou anticipations de vert et aux transitoires de changement de cycles). Les durées choisies des temps de cycle à Nancy sont le résultat d'une étude expérimentale lors de l'implantation du système et se sont avérées être les meilleures pour les états de trafic auxquels elles correspondent et pour la géographie de la ville.

Certaines contraintes empêchent le système de fonctionner véritablement en temps réel, d'une part parce que la méthode de calcul des taux d'occupation non synchronisée sur le cycle impose un lissage sur plusieurs valeurs par moyenne pondérée et, d'autre part, parce qu'il n'est pas possible de faire varier sans cesse la durée du cycle à cause du transitoire qui en découle à chaque changement et qui perturbe la stratégie. Ces changements ont effectivement lieu s'il y a suffisamment de carrefours pour le "demander" dans le groupe concerné et cela, après trois balayages des carrefours.

Sur le plan de la commande, 32 plans de feux par carrefour sont possibles, l'ordinateur n'en gérant en général que 8, les autres sont utilisés pour les situations exceptionnelles telles que les travaux. Il existe un plan de feux pour le cycle de 55 secondes et un plan de feux pour le cycle de 70 secondes ; pour le cycle de 90 secondes, où 6 plans de feux sont possibles, une régulation stratégique est mise en place qui permet de faire varier les temps de vert relatifs entre les voies principales et secondaires en fonction du trafic mais surtout en fonction de la décision ou non d'effectuer de la rétention. Le système commande les carrefours par groupes ; ces

¹⁹Programme de séquencement des feux tricolores

derniers rassemblent des carrefours qui sont proches les uns des autres ou en tout état de cause qui sont fortement interdépendants. Les plans de feux sont programmés dans les armoires de commande sur le terrain et le système centralisé n'envoie que quelques paramètres pour le choix de plans de feux dans cette bibliothèque.

Une priorité aux transports en commun est implantée. La compagnie CGFTE qui gère les transports en commun dans l'Agglomération de Nancy utilise un S.A.E. (Système d'Aide à l'Exploitation) qui lui permet de connaître à tout instant la position de chaque autobus ou trolleybus sur le réseau. Ce S.A.E. est commercialisé par la firme C.G.A. (Compagnie Générale d'Automatismes). Il existe une connexion entre le système de régulation (S.R.) et le S.A.E. qui fonctionne de la manière suivante :

- ⦿ si un autobus n'est ni en avance ni beaucoup trop en retard et qu'il arrive à un carrefour, le S.A.E. demande au S.R. de lui accorder une priorité.
- ⦿ si c'est possible au vu du trafic et du séquencement des feux tricolores, le S.R. appliquera une anticipation ou une prolongation de vert pour laisser passer le bus.

Bibliographie : [Roffet & al. 87] [SIEMENS 90] [Thuillier & al. 77]

Implantations des systèmes SIEMENS : Il s'agit du premier constructeur mondial présent dans la plupart des villes allemandes, autrichiennes et plusieurs autres villes de par le monde. C'est de loin le système le plus répandu.

2.3 Automatisation du déplacement des caméras

Ce premier travail, réalisé par Jouannet est détaillé dans le chapitre sur les anomalies. Il consiste en la récupération des informations provenant des boucles magnétiques et en l'utilisation de celles-ci pour déplacer automatiquement les caméras afin de visualiser l'endroit où l'anomalie est créée [Jouannet 89]. Ceci permet aux opérateurs du poste central de la circulation d'être informés directement sur l'endroit de l'anomalie et la situation du trafic.

Les variables utilisées pour détecter l'anomalie sont les taux d'occupation et les débits²⁰ par interrogation de chaque boucle magnétique tous les dixièmes de seconde.

A partir de ces deux variables, trois possibilités de détection sont mises en place [Jouannet 89 pages 70 à 75] :

- * La détection à partir de modèles (un par détecteur) qui ont été mis en place à l'installation du système et qui peuvent être changés si nous nous apercevons d'une évolution du trafic. Le modèle est de la forme $NV = a.(TO)^b$ ²¹. Au delà d'un certain seuil de validation de la zone critique, le système détecte une anomalie si la situation de trafic est en dehors du domaine de

²⁰Nombre de véhicules par unité de temps

²¹NV : Nombre de véhicules ; TO : Taux d'occupation => voir Glossaire

tolérance du modèle choisi.

- * La détection d'anomalies du trafic à partir du dépassement d'un seuil de pourcentage de taux d'occupation. Ce seuil peut être modifié par les opérateurs du poste central.
- * La détection par dépassement d'un nombre maximal de véhicules ; en fait, ce test a plutôt une vocation de maintenance car l'atteinte de valeurs élevées de débit est impossible, par conséquent, la détection de tels dépassements suppose une défaillance du capteur considéré.

Ce système est satisfaisant pour ce qui concerne la détection d'une anomalie déjà effective, il nécessite une phase d'attente avant de prendre sa décision pour valider celle-ci mais il ne propose pas de classification d'anomalies.

3. Système de Paris

3.1 Présentation

La ville de Paris comprend plus de deux millions d'habitants.

Elle utilise un système de régulation développé par CGA-HBS* qui est installé sur la ville proprement dite depuis 1982. Ce système est dénommé SURF : Système Urbain de Régulation des Feux et d'un coût approximatif de 130 MF.

Il n'y a pas de connexion à l'heure actuelle entre Paris et la banlieue ; chaque département de la petite couronne dispose de son propre système de régulation : GERFAUT (Gestion et Exploitation des Régulations de Feux Automatisés) dans la Seine-Saint-Denis et PARCIVAL (Pilotage Automatique de la Régulation des Circulations du VAL de Marne), ce sont tous deux des systèmes CGA.

Le système SURF gère à Paris 359 carrefours répartis en 8 zones, 100 carrefours sont en cours d'équipement et 70 en projet. La Ville de Paris comprend en tout 1400 carrefours et projette d'en réguler 900 d'ici à 1995. 90 % des carrefours non coordonnés par SURF sont coordonnés par horloge et recalés par courant porteur sur le secteur EDF pour éviter les éventuels décalages (Pulsadis).

Les capteurs utilisés sont les suivants :

- 320 boucles magnétiques de 1 m de côté pour mesurer les Taux d'Occupation.
- 193 postes de débit ($2n - 1$) boucles magnétiques de 1 m de côté dont une boucle sert également à mesurer les TO. Le paramètre n représente le nombre de voies sur la chaussée considérée.

- Des radars à effet Doppler pour mesurer la vitesse en sortie des carrefours, ils sont utilisés comme détecteurs de remontée de file d'attente. Il y a 64 détecteurs de remontée, la plupart sous forme de radars, quelques-uns sous forme de boucles.

- Environ 70 caméras urbaines plus quelques autres (Les Halles, voies sur berge, périphérique). L'utilité de ces caméras réside simplement dans la télésurveillance (situation in visu du trafic et éventuellement maintenance si découverte d'un carrefour défaillant).

3.2 Stratégie du système SURF

Ce système utilise une stratégie de premier type {chap.1 § 3.2}. Le choix des plans de feux dans la bibliothèque prédéfinie se fait par la méthode des seuils, par la méthode du vecteur ou par choix horaire.

Le système comprend un ordinateur qui gère l'ensemble des zones ainsi qu'un ordinateur de secours en cas de défaillance de l'ordinateur principal. La stratégie est basée sur la multiprogrammation, c'est-à-dire le choix de plans de feux dans une bibliothèque.

Pour toute la journée, il existe des plans de feux préétablis sélectionnés par horloge, seize plans de feux par zone sont disponibles :

- En régime fluide, analyse des débits sur les axes principaux et choix des plans de feux par analyse vectorielle dans une bibliothèque de plans de feux préétablis.
- En régime saturé, détection automatique de la saturation par la mesure des taux d'occupation, abandon du choix des plans de feux selon les débits, choix des plans de feux horaires et actions par le système expert SAIGE* sur les carrefours équipés.
- En micro-régulation, anti-blocage* de carrefours, résorption de files d'attente, escamotage d'une phase* de vert, priorité bus, appels piétons, adaptation du vert par "intervalles-véhicules".

Il existe 3 plans de feux de jour et 2 plans de feux de nuit. Les cycles ont des durées de 60 secondes la nuit et 70, 80 ou 90 secondes le jour, selon les zones.

Les changements de cycle s'effectuent par conservation des pourcentages respectifs de vert sur la principale et sur la transversale. Le transitoire s'effectue sur un cycle seulement. Ce dernier dure par conséquent le moins de temps possible.

L'information utilisée est l'indicateur "BRP"²² qui s'exprime par :

$$\text{vitesse moyenne} = \frac{\text{distance parcourue}}{\text{temps passé}}.$$

Cette valeur est déterminée à partir des taux d'occupation et des débits ; les boucles envoient pour cela un message toutes les 5 secondes.

L'information envoyée aux contrôleurs de carrefour est le téléchargement du plan de feux en cours au carrefour à l'aide d'un message de 128 octets. Seuls 5 % des carrefours environ utilisent la micro-régulation.

Le fonctionnement dégradé est le suivant : le carrefour passe en local après avoir fini un cycle au bout de 12 secondes, s'il n'a pas été appelé par l'ordinateur.

²² "BRP" sont les initiales de Bonvalet-Robin-Prévallée.

Concernant les priorités aux transports en commun, 3 lignes de bus en zone périphérique sont équipées de priorité aux bus et ceux-ci sont reconnus à l'aide de balises hyper-fréquences. Bibliographie : [Bonvallet & al. 87] [Dély 90] [GERFAUT 91] [PARCIVAL] [Paris 87] [Rousseau & al. 87] [Vercammen 87].

Implantations des systèmes CGA : Plusieurs implantations en France, c'est le plus grand fournisseur français. Abidjan également équipée. Certaines implantations ont des noms particuliers : CAPITOUL (Toulouse), GERFAUT (Seine-St-Denis), PARCIVAL (Val de Marne), SURF (Paris), SIRAC (Strasbourg).

3.3 Système de détection d'anomalies SAIGE/SAIGE

Il s'agit d'un système de détection d'anomalies utilisant l'intelligence artificielle. Ce système a été développé par l'INRETS*, qui travaille actuellement sur un moteur d'inférence plus puissant, et est commercialisé par CGA-HBS. SAIGE (Système d'Aide Intelligent à la Gestion des Embouteillages) doit se comporter comme le ferait un opérateur humain face au problème d'anomalies. SAIGE se greffe sur le système de régulation (SURF) et n'intervient pas à l'intérieur de celui-ci, il ne fait que demander à SURF de réaliser telle ou telle action.

L'idée de SAIGE est de tenir compte de l'historique. En effet, il est important de savoir, lorsqu'un état d'anomalie est atteint, comment ont évolué les paramètres pour parvenir à cet état ; SAIGE note les chaînons* saturés ; chaque zone est divisée en sous-zone, une sous-zone est un petit groupe de carrefours sur lesquels sera appliquée une stratégie d'anti-saturation*. A chaque plan de feux sont adjoints trois sous-plans de feux favorisant la retenue sur la principale. Le raisonnement est dépendant du site, il s'appuie sur des données qualitatives, voire sur des données incomplètes que l'opérateur cherche à compléter soit par sa connaissance et sa pratique soit par l'emploi de caméras. Le raisonnement est également dépendant du temps, c'est-à-dire que la compréhension des phénomènes passe par la considération des enchaînements des diverses saturations et leur suivi dans le temps. Il est intéressant de noter que SAIGE s'inscrit dans une démarche "résolution de problèmes" qui s'oppose à la démarche cognitive traditionnelle en intelligence artificielle. Ici, il ne s'agit pas d'effectuer une "capture" des connaissances des experts mais plutôt de proposer des méthodes pour faire face aux problèmes rencontrés.

En juin 1989, certaines étapes restaient à franchir pour atteindre la maîtrise industrielle. Un grand nombre de questions restent posées, relativement à la maintenance et à l'évolution de la base de connaissances. La technique des systèmes experts conduit à des développements longs et difficiles pour traiter le problème dans sa globalité. SAIGE utilise une logique du premier ordre à l'aide du moteur d'inférence SNARK [Foraste & al. 86 p.921].

La base de connaissances contient 5000 faits (relatifs au réseau) et 200 règles (ordre 1).

Les utilisateurs finaux de SAIGE (ingénieurs de la ville de Paris) sont convaincus de son efficacité et manifestent un vif intérêt pour la technique des systèmes experts. En revanche, les opérateurs se montrent plus réservés quant à l'amélioration de la gestion du trafic. Les opérateurs admettent toutefois l'impossibilité de suivre une zone beaucoup plus étendue sans l'automatisation de certaines prises de décision. Les exploitants soulignent l'intérêt de SAIGE de pouvoir "rejouer" a posteriori une situation.

SAIGE utilise un ordinateur Appollo DN 4000 qui contient le moteur d'inférence et la connexion avec SURF, trois HP9000 pour l'imagerie, la structure des données et l'interface utilisateur puisque SAIGE dispose de possibilités graphiques assez puissantes.

Bibliographie : [Capitaine & al. 87] [CEGELEC 88] [Fantin 86] [Forasté & al. 86] [Lesort 89 p.1224] [Paris 87] [SAGE 89] [Scemama 89]

4. Système de Bordeaux

4.1 Présentation

Bordeaux compte 210 000 habitants dans une agglomération de 620 000. Cette dernière croît plus vite que la ville. 27 communes font partie de la Communauté Urbaine qui gère la régulation. Le système de régulation est GERTRUDE (Gestion Electronique de Régulation du Trafic Routier Défiant les Embouteillages). Il est développé par la Communauté Urbaine et installé à partir de 1976.

La communauté comprend 820 carrefours dont 400 sont régulés et 50 coordonnés par des carrefours maîtres et esclaves sans être reliés au poste central de la circulation. 4 carrefours critiques au centre ville ont été à l'origine du développement des 4 premières zones régulées par GERTRUDE ; à l'heure actuelle, il y a 26 zones.

2300 capteurs sont utilisés, pour 95 % ce sont des boucles magnétiques, le reste étant constitué de quelques radars utilisés pour les équipements isolés ou provisoires.

Les boucles se répartissent en 16 compteurs de débit et 16 détecteurs de remontée de file d'attente par zone (ce sont les capteurs de stratégie) ainsi qu'environ 4 capteurs par carrefour pour l'adaptativité. La micro-régulation, c'est-à-dire les valeurs des temps de vert dans les plages permises par la régulation centralisée, a lieu toutes les secondes.

Il n'y a pas de caméras.

4.2 Stratégie du système GERTRUDE

GERTRUDE est un système du second type qui tire sa dynamique d'un programme "expert" adaptant en temps réel l'écoulement de la circulation en fonction des différentes informations qui lui sont transmises et notamment la tendance à la saturation des carrefours. A Bordeaux, les gains de temps sont de l'ordre de 20 % aux heures creuses et de 50 % aux heures de pointe pour les voitures particulières. Les bus voient leur vitesse croître de 7 % en heures creuses et de 35 % en heures de pointe. GERTRUDE repose sur le principe des ondes vertes complété par une méthode d'ajustement à intervalles de temps courts (une seconde) des paramètres des ondes vertes. Le système intègre une gestion des véhicules en excès par création de sas de stockage permettant un contrôle très strict de l'accès au centre ville et une concentration des files d'attente là où elles sont le moins gênantes (cette idée, reprise depuis, était ici originale).

La structure est hiérarchisée et comprend un calculateur dédié à la circulation générale, un autre affecté aux transports en commun et à la pollution (CO_2 et bruit) et un dernier utilisé pour le dépouillement statistique. Chaque zone (26) dispose de son propre ordinateur de zone. Chaque zone envoie des compte-rendus toutes les 5 minutes (état des capteurs, capteur qui est à l'origine du changement de cycle). Toutes les secondes, le système s'informe de l'état de la circulation.

Les informations utilisées par le système pour établir sa stratégie sont le comptage, les longueurs de file d'attente, les intervalles véhiculaires et les durées d'attente. Le système envoie quant à lui explicitement à chaque feu l'état dans lequel il se trouve.

Le synoptique donne des informations de débit et de temps d'attente pour les files. Des voyants indiquent les dépassements à des seuils déterminés en fonction du moment de la journée : ceci permet de détecter des anomalies accidentelles.

Les cycles varient de 60 à 105 ou 110 secondes, de 5 en 5 secondes.

En fonctionnement dégradé, le contrôleur local prend la main, certains carrefours pouvant rester coordonnés. Si le superviseur tombe en panne, les coordinateurs de zone fonctionnent sans problème, les interactions entre zones étant faibles, elles ont en effet été étudiées dans ce but. Si un coordinateur de zone tombe en panne, la régulation ne s'effectue plus dans la zone concernée mais les carrefours restent coordonnés.

L'intervention manuelle n'existe que dans les cas exceptionnels (travaux, manifestations) car le système est capable de s'adapter de lui-même à presque toutes les situations.

L'augmentation des débits sur les chaînons dont parle la littérature s'effectue en fait par regroupements par paquets des véhicules au moment de passer le feu au vert, pour que le temps

de vert voie passer un maximum de véhicules et qu'il soit le moins possible inutilisé.

Les bus bénéficient de couloirs sur les maillons excédentaires qui servent aussi de zones de rétention pour les voitures particulières dans le but de fluidifier la circulation générale. Cette idée fut en son temps une originalité du système bordelais ; elle a été depuis reprise par beaucoup.

Un SAE²³ a été installé courant 1991 et sera connecté à l'ordinateur de la régulation générale plus tard. En attendant, les autobus de 2 lignes ont des émetteurs et dialoguent avec des boucles spécifiques permettant des prolongations ou anticipations de vert par demande directe au carrefour, le bus a par conséquent systématiquement priorité sauf s'il est en avance.

Les véhicules de pompiers ont des capteurs spéciaux (boucles spécifiques à haute fréquence), ils sont pris en compte par le système de régulation sur 5 itinéraires prévus.

Une particularité de GERTRUDE est de prendre en compte, par l'intermédiaire de capteurs, la pollution atmosphérique et les nuisances sonores. Ces valeurs sont exploitées par la régulation pour éviter la rétention dans les endroits où les taux de pollution sont au-dessus ou égaux à certaines limites.

Bibliographie : [Annales 90] [Fantin 86 page 12] [Franceries 78] [GERTRUDE 80] [Lesort 89 page 1223]

[Morrish 80] [Gertrude face à la presse]

Implantations de GERTRUDE : Bordeaux, Reims (REMI), Lisbonne, Fort de France, La Roche sur Yon.

5. Système PRODYN

5.1 Présentation

Il nous faut d'abord spécifier que PRODYN (PROgrammation DYNamique) est un algorithme en cours de développement qui est maintenant commercialisé par un consortium mené par GTME pour la version "décentralisée", tandis que CGA se propose d'intégrer la version "hiérarchisée" pour la greffer sur ses systèmes de régulation traditionnels. Ce système a été mis au point à Toulouse sur la ZELT (Zone Expérimentale Laboratoire de Toulouse).

La ZELT se situe dans une partie de la ville de Toulouse sur laquelle peuvent être expérimentés divers algorithmes de commande de feux tricolores ; la ZELT s'étend sur 400 hectares et dispose d'un poste de commande spécifique. Cette zone se situe dans les quartiers sud-est de Toulouse à un endroit choisi en raison de la diversité des configurations de trafic et

²³Système d'Aide à l'Exploitation pour les transports en commun

de voirie possibles. La ZELT a pour objectifs la recherche, la technologie et l'industrie, ainsi que la formation ; en matière de recherche, cette zone pourra servir pour effectuer des expérimentations sur l'amélioration de la sécurité, de la mobilité et de la vie des quartiers, la lutte contre les nuisances, les économies d'énergie, les fonctionnements en mode dégradé ... 30 carrefours sont équipés, chacun pouvant comporter jusqu'à 64 capteurs.

5.2 Stratégie du système PRODYN

C'est un algorithme expérimenté sur la ZELT de Toulouse à partir de 1984. Le but d'une commande temps réel est de réagir instantanément aux variations de trafic. PRODYN est un algorithme temps réel puisqu'il est basé sur un type de méthode d'estimation-prédition. PRODYN utilise deux pistes de mesures par chaînon, le premier P1 à l'entrée, le second P2 à une distance de la ligne de feux telle que les véhicules mettent 5 secondes pour la parcourir à la vitesse désirée (75 ou 54 km/h). P1 fournit toutes les 5 secondes le nombre de véhicules, tandis que P2 fournit toutes les secondes le Taux d'Occupation. Les deux postes ont pour fonction de permettre l'estimation et l'anticipation des variables d'état "trafic" du modèle. PRODYN fait appel à une structure multiprocesseur. Un microprocesseur est associé à chaque carrefour et un microprocesseur central coordonne l'ensemble des carrefours. En temps gagné par les usagers par rapport à un temps fixe, le gain est de l'ordre de 25 % pour un carrefour isolé (cycle calculé par Webster) et de 16 % pour un réseau de 10 carrefours avec un plan calculé par Transyt^{*} 7, ceci en simulation.

PRODYN réalise une optimisation au niveau de chaque carrefour puis au niveau global du réseau. Nous constatons de plus que les différents carrefours ne doivent pas nécessairement fonctionner sur un cycle commun, ni même fonctionner individuellement de manière cyclique. La souplesse de fonctionnement est donc totale.

PRODYN a été testé d'abord sur un carrefour. Pour équiper un réseau, il existe deux versions :

- Une version hiérarchisée dans laquelle chaque carrefour fait un calcul et envoie au coordinateur son résultat ; celui-ci vérifie, envoie des paramètres, un nouveau calcul se fait et ainsi de suite jusqu'à convergence de la méthode. On voit tout de suite poindre les limites d'un tel système temps réel ; cette méthode a été simulée mais pas testée.

- Une version décentralisée donne des résultats très proches en simulation et a de plus été expérimentée sur le terrain. Dans celle-ci, le carrefour envoie ses informations au carrefour aval qui les utilisera pour le cycle suivant.

Bibliographie : [Durgeat & al. 86] [Henry & al. 84] [Henry & al. 89] [Khoudour & al. 88] [Khoudour & al. 90] [Lesort 89] [Olivero 87]

Implantation de PRODYN : début de commercialisation. Mise au point effectuée sur la ZELT à Toulouse, implantation prévue à Niort.

Annexe B - Carte et programmes pour l'acquisition

1. Introduction

La présente annexe va exposer le matériel et le logiciel qui ont été mis en place pour permettre les campagnes d'acquisition de mesures au poste central de la circulation.

↗ : les références bibliographiques relatives à cette annexe sont détaillées dans la liste des références bibliographiques de la seconde partie.

2. Installation de la carte et du programme au poste central de la circulation pour l'étude approfondie des flux et autres variables sur le carrefour 38

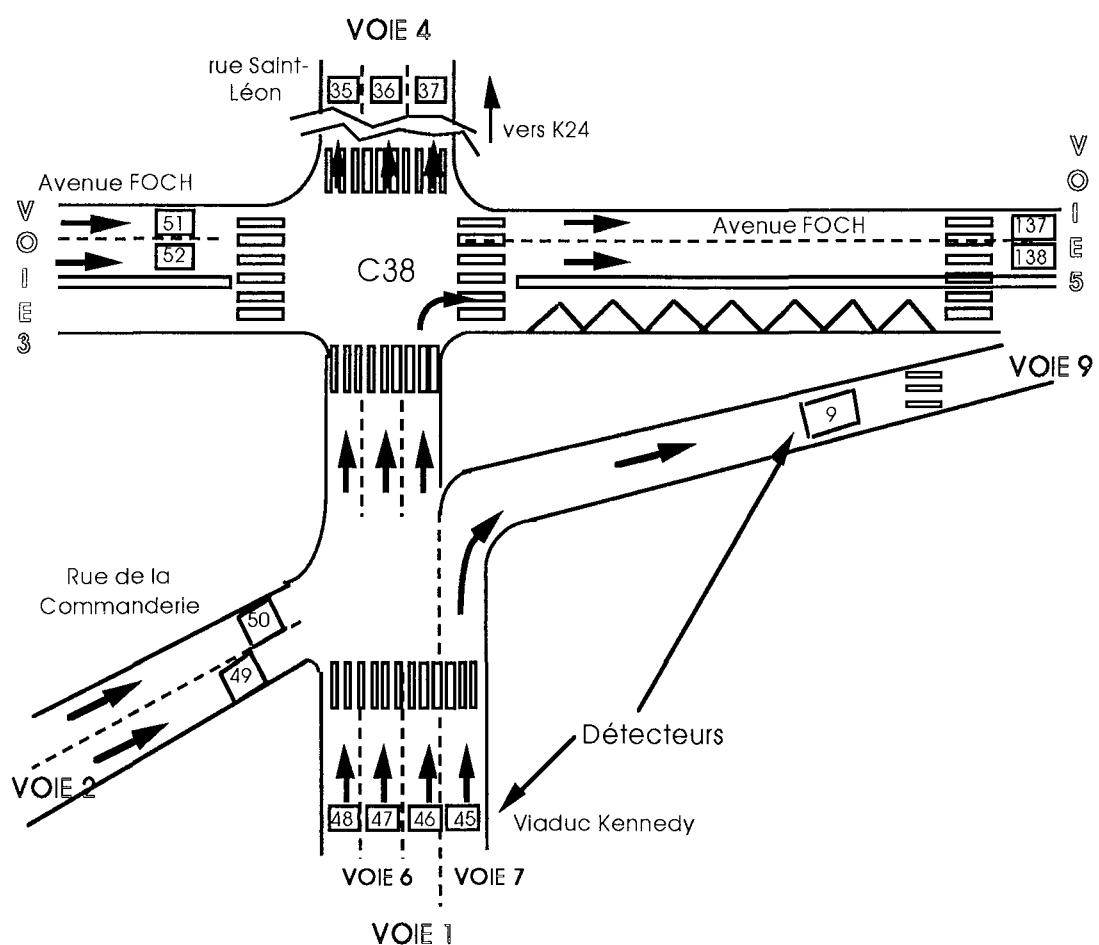


Figure 2.a : Le carrefour 38

Cette étude a pour but de modéliser le carrefour 38 en vue de déterminer très précisément les situations d'anomalies et les causes de celles-ci.

Nous avons instrumenté le carrefour 38 dans l'objectif de pouvoir connaître tous les flux entrants et sortants du carrefour, sans perte autres que les erreurs. Pour cela, la boucle 9 a été ajoutée à notre demande (voir le schéma du carrefour ci-dessus) tandis que les autres boucles, existantes, nous permettent de déterminer tous les flux à l'exception du couloir bus. Le nombre de bus provenant du viaduc Kennedy et bifurquant sur l'Avenue Foch est très faible (30 bus quotidiens pour la ligne 44 et 45 pour la ligne 8). Nous avons ensuite installé une carte d'acquisition dans le micro-ordinateur Tandon du poste central de la circulation. Cette carte reçoit les informations **brutes** envoyées par le carrefour 38 à l'ordinateur Siemens, par l'intermédiaire des opto-coupleurs conçus pour le système de J.P. Jouannet. Pour nous, il est important de travailler à partir d'informations brutes (occupation ou non des boucles magnétiques, renvois de vert et de jaune clignotant des carrefours 38 et 24) car nous voulons utiliser la variable qui nous semble la plus pertinente dans notre modélisation.

Sur le plan logiciel, diverses procédures Turbo Pascal ont été développées pour effectuer l'acquisition des données du carrefour (acquisition toutes les 100 ms, synchronisées sur l'horloge interne du PC, de 20 entrées ce qui équivaut à trois octets), ainsi que les procédures de transformation en ASCII et les procédures de calcul des variables nous intéressent.

Les données acquises sont celles des boucles d'entrées du carrefour C38 (B45, B46, B47, B48, B49, B50, B51 et B52), les boucles de sorties du C38 (B137, B138 et B9 ainsi que les boucles B36, B37 et B38 qui sont en même temps boucles d'entrées sur le C24 et plus proches de celui-ci), les renvois de vert des voies principales et secondaires et les renvois de jaune clignotant pour les deux carrefours C38 et C24.

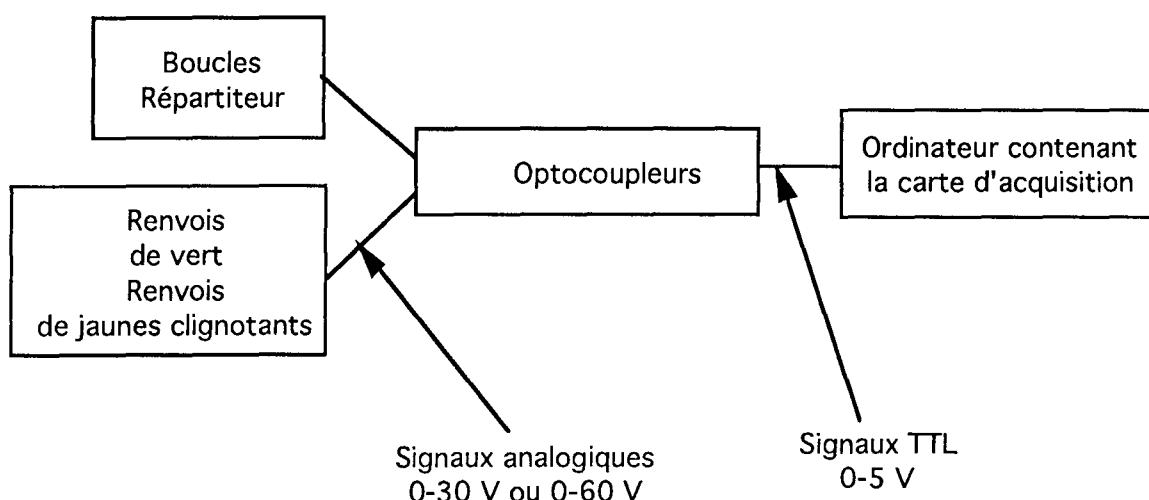


Figure 2.b : Schéma du montage pour l'acquisition

3. Campagnes de mesure et validations

Diverses campagnes de mesure ont été effectuées sur plusieurs journées. Une campagne de 24 heures d'acquisition équivaut à 2,6 mégaoctets de données. Nous avons été dans un premier temps confronté au problème de la gestion de fichiers très importants par les logiciels de calculs mathématiques et statistiques (MATLAB [Matlab 88]) et avons été amené à passer sur une station de travail fonctionnant sous UNIX, ce qui nous a permis de traiter ces fichiers très importants non seulement plus rapidement mais même dans certains cas de pouvoir simplement les traiter ce qui était impossible sur le PC. Pour parvenir à cela, il nous a fallu réécrire un certain nombre de procédures de traitement et de calculs de données en C.

La validation des données s'est effectuée en deux temps, une validation des données acquises par le système d'acquisition et une validation des programmes informatiques utilisés.

3.1 Validation des données acquises par le système d'acquisition

Il s'agit ici de vérifier que les données acquises sont bien les données attendues. Cette observation s'est effectuée de manière classique :

- * Une vérification de la cohérence des données avec les résultats attendus, par analyse des passages des véhicules dans le cycle. Les **points de mesure** ont en général un comportement typé et il est par conséquent facile de reconnaître une boucle appartenant à un point de mesure d'une boucle appartenant à un autre point. Par contre, il est difficile d'avoir par ce moyen la certitude en ce qui concerne une boucle d'un point de mesure avec une autre boucle du même point. Les points de mesure sont les suivants : B35 avec B36 et B37, B45 seule, B 46 avec B47 et B48, B49 seule, B50 seule, B51 avec B52, B137 avec B138, B9 seule.
- * Une comparaison sur certaines périodes de mesure de comptages effectués manuellement à des comptages effectués par le programme informatique. L'erreur entre les mesures manuelles et les mesures informatiques pour plusieurs périodes de mesure est relativement négligeable (de l'ordre de 3 %).

3.2 Validation des programmes informatiques

Une fois les données validées, nous avons vérifié le bon fonctionnement de programmes de calcul du nombre de véhicules en comparant celui déterminé par l'ordinateur SIEMENS de régulation de trafic à celui déterminé par le TANDON. Pour cela, nous avons été confrontés au

problème de synchronisation entre les périodes de comptage des deux ordinateurs. Etant un problème difficile à résoudre, nous nous sommes contenté de compter les véhicules sur des périodes longues, ce qui n'est qu'à demi-satisfaisant puisque certaines erreurs doivent de ce fait se compenser. Nous obtenons une corrélation de 99,78 % entre les comptages effectués par les deux ordinateurs.

Nous avons naturellement validé l'ensemble de nos programmes en effectuant, manuellement sur des séries de points, les calculs réalisés par le programme dans le but de vérifier que ce dernier calculait bien les variables nous intéressantes.

Annexe C - Détection d'anomalies sur un axe

Pour effectuer la détection, nous souhaitons dans une première étape nous inspirer des travaux du projet DRIVE MONICA V1056, c'est-à-dire instrumenter un axe et faire de la détection d'anomalies en étudiant comparativement la situation sur les capteurs (boucles) amont et aval à cette anomalie [DRIVE 91].

Dans une seconde étape, nous projetons la généralisation dans l'espace de l'étude précédente. En liaison avec le poste central de la circulation, nous souhaitons instrumenter une artère (par exemple le boulevard Jean Jaurès) afin d'observer les évolutions des flux parallèles et d'analyser les répercussions d'une anomalie au niveau des carrefours situés en amont et en aval.

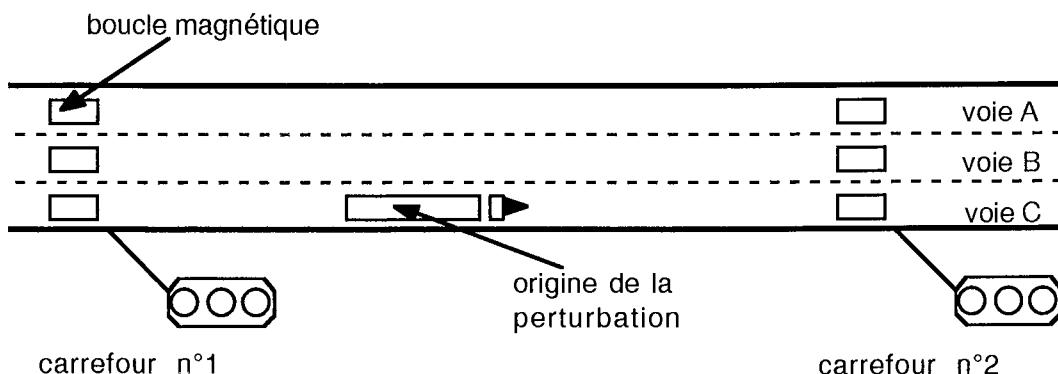


Figure 1 : Perturbation sur un axe

En effet, nous pouvons supposer qu'en l'absence d'anomalies, il existe une certaine corrélation entre les flux et les taux d'occupation de plusieurs voies d'un même chaînon*. L'apparition d'une perturbation sur la voie C entre les carrefours 1 et 2 est susceptible de se traduire par une modification significative des valeurs de ces corrélations.

Finalement, nous n'avons pas retenu cette zone essentiellement pour des raisons pratiques et financières. Nous nous sommes par conséquent focalisés sur le carrefour 38 qui présentait l'avantage d'être bien instrumenté {Annexe B}.

Dans les paragraphes ci-dessous est présentée l'étude menée par le TRRL.

* : les références bibliographiques relatives à cette annexe sont détaillées dans la liste des références bibliographiques de la seconde partie.

1. Algorithme utilisé

L'algorithme fonctionne sur un chaînon. Le chaînon est défini comme étant la zone située entre deux ensembles de détecteurs : les détecteurs amont ‘upstream detectors’ dU et les détecteurs aval ‘downstream detector’ dD. L'algorithme est basé sur les cycles et utilise les flux (nombre de véhicules) et les taux d'occupation pour détecter un incident entre les détecteurs. Il est nécessaire d'implanter un détecteur par voie. Le détecteur aval peut se situer après ou avant les feux tricolores.

Les variables utilisées par l'algorithme sont les suivantes :

q	débit ²⁴	o	occupation
qs	débit lissé	os	occupation lissée
qd	débit dispersé	od	occupation dispersée
qf	drapeau du débit	of	drapeau d'occupation

Les valeurs ci-dessus se réfèrent au cycle précédent, le cycle courant est représenté par ', par exemple q_s' .

Le flux est mesuré par cycle et multiplié par un facteur pour être ramené à 300 secondes de manière à éviter de prendre en compte la durée variable des temps de cycle, un véhicule est compté lorsque l'état de la boucle passe de 0 à 1. Le taux d'occupation est mesuré par cycle en %. La période d'échantillonnage pour le calcul des taux d'occupation est de 1/4 de seconde.

Les calculs sont effectués à chaque cycle, plus précisément à la fin de chaque cycle (celui-ci est déterminé à la fin du temps de vert sur le chaînon alimenté par le détecteur amont dU), de manière à minimiser les effets causés par la nature cyclique de la circulation.
Les données des détecteurs amont et aval sont analysées en tenant compte de la synchronisation des boucles avec un carrefour plutôt qu'un autre.

Des drapeaux sont mis en place dans les cas suivants :

$$qfU' = q < qs - a1.qd \quad ofU' = o > os + a3.od$$

$$qfD' = q < qs - a2.qd \quad ofD' = o < os - a4.od$$

Les coefficients a permettent de moduler la sensibilité de l'algorithme, la valeur typique est a = 2.

Il y a deux copies des valeurs os et od. Normalement ces deux copies sont identiques. La première copie est remise à jour à chaque cycle, la seconde est conservée tant que le drapeau est mis en place. La copie conservée est ensuite utilisée pour déterminer s'il faut mettre à jour le drapeau pour les cycles suivants.

²⁴Nombre de véhicules par unité de temps

Les valeurs dispersées et lissées sont calculées de la manière suivante :

$$qd' = m.abs(q - qs) + (1 - m).qd$$

$$od' = m.abs(o - os) + (1 - m).od$$

où $m = 0,1$ et $f = 0,2$.

$$qs' = f.q' + (1 - f).qs$$

$$os' = f.o' + (1 - f).os$$

2. Détection d'incidents

L'incident est détecté en fonction des états des drapeaux des détecteurs amont et aval.

$$\text{incident} = qfU \text{ and } ofU \text{ and } qfD \text{ and } ofD$$

L'algorithme peut ne pas utiliser tous les drapeaux, particulièrement dans le cas de boucles magnétiques couvrant plusieurs voies à la fois.

3. Extensions de l'algorithme

L'algorithme peut être étendu par :

- * L'utilisation de l'information provenant d'autres chaînons pour confirmer l'existence de l'incident et/ou indiquer la gravité de celui-ci. Le chaînon amont peut confirmer un incident en donnant un flux faible et une forte occupation, tandis que le chaînon aval peut donner un flux et une occupation faibles tous deux.
- * L'utilisation de l'historique : c'est l'accumulation des valeurs de flux et occupation sur plusieurs jours pour pouvoir prédire les niveaux et variations.

Nous pouvons utiliser plusieurs cycles pour détecter un incident. Ceci permet de réduire les fausses alarmes.

Annexe D - Cahier des charges

Le présent cahier des charges rappelle les six tâches qui avaient été mentionnées dans la convention qui liait le Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN CNRS URA n°821) et la Ville de Nancy.

Tâche 1 - Etude du système de régulation de trafic de la ville de Nancy

Tâche 2 - Etude prospective des différents systèmes de régulation de trafic existant dans les grandes métropoles françaises et dans des villes étrangères

Tâche 3 - Etude statistique de l'historique des anomalies de trafic détectées par l'intermédiaire du système de positionnement de caméras

Tâche 4 - Caractérisation des différents types d'anomalies de trafic

Tâche 5 - Etude de faisabilité d'une modélisation des anomalies de trafic

Tâche 6 - Intégration éventuelle des modèles élaborés précédemment dans une stratégie de régulation de trafic

Annexe E - Glossaire

ALI-SCOUT : Système de guidage SIEMENS, testé à Berlin.

Anti-blocage : action de micro-régulation qui consiste à diminuer ou à prolonger le vert ou le rouge de dégagement d'une ligne de feux pour éviter la congestion en aval, en amont ou interne à un carrefour.

Anti-saturation : action de micro-régulation qui consiste à mettre en œuvre un nouveau plan de feux lorsque l'on constate que la demande dépasse l'offre. Ce nouveau plan de feux est calculé pour déplacer les files d'attente dans les sas où elles sont le moins gênantes.

ATSAC : Automated Traffic Surveillance and Control.

C24, C38 : Carrefours 24 & 38.

CBD : Central Business District (= hypercentre).

CETE : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement.

CETUR : Centre d'Etudes et des Transports Urbains.

CGA/CGA-HBS : Compagnie Générale d'Automatismes.

Chaînon : tronçon de voie entre deux carrefours.

Cycle : durée séparant deux passages successifs de l'ensemble des feux par le même état après admission de tous les courants de véhicules.

DAN : District de l'Agglomération Nancéienne.

Débit (traffic flow, traffic volume) : Nombre de véhicules par unité de temps.

Décalage : la différence de durée entre un point défini d'un cycle de signal ou de feu à un croisement et soit un point similaire dans le cycle à un autre croisement, soit un point défini de référence du système.

Décalage (offset) : A cause de la distance existant entre le feu tricolore et la boucle servant aux mesures sur la voie correspondante, l'influence des feux se fait sentir avec un certain décalage au niveau des boucles. Ce décalage se matérialise de manière complémentaire selon que nous nous focalisons sur un véhicule ou sur la boucle.

Au niveau de la boucle, le phénomène se manifeste par un retard entre le passage du feu au vert et le démarrage du véhicule qui était stocké sur la boucle ; de même, le feu peut être encore vert lorsque le véhicule passe au niveau de la boucle et rouge lorsque celui-ci arrive à la barre de feu.

Si nous tenons compte des véhicules, le phénomène se manifeste par une "anticipation" car le feu peut être encore rouge (en fin de phase) quand le véhicule traverse la boucle et être vert quand ce véhicule atteint la ligne de feux. Le phénomène équivalent peut être observé dans le cas d'un véhicule traversant la boucle lorsque le feu est vert (en fin de phase) et arrivant au rouge au niveau du feu.

Etat : l'examen du diagramme des feux montre que celui-ci est constitué d'une succession d'états ; chaque état (éteint - vert - jaune - rouge) est décrit par une fonction de chacune des lignes du diagramme.

GERTRUDE : Gestion Electronique de Régulation du Trafic Routier Défiant les Embouteillages.

Headstart : anticipation au départ.

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

NV : Nombre de Véhicules.

O-D = matrice O-D (matrice Origine-Destination).

OPAC : Optimization Policies for Adaptive Control.

PC : Poste Central pour la régulation du trafic.

PC : Personal Computer (ordinateur personnel compatible IBM).

Peak hour : heure de pointe.

Perte (fonction) : fonction perte = loss function.

Phase de circulation : Durée pendant laquelle un ou plusieurs courants sont admis simultanément sur un carrefour.

Phase de commande : déroulement d'allumage complet, pendant un cycle, d'un signal ou d'un groupe de signaux fonctionnant de manière identique ; la présentation sur le diagramme est constituée de lignes horizontales.

PIAF: Pilote Informatique d'Armoires de Feux.

Plans de feux : programme de séquencement des états des feux tricolores.

Pourcentage directionnel : indique la proportion de véhicules qui, provenant d'une voie i d'entrée, se dirigera vers une voie j de sortie.

PRODYN : PROgrammation DYNamique.

PROMETHEUS : Programme for European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety.

RESCU : Régulation Entrées-Sorties en Contexte Urbain.

Rouge intégral : état de repos de tous les feux d'un carrefour au rouge.

RV_xC_y : RV = renvoi de vert, x = 1 pour la voie principale, x = 2 pour la voie transversale, Cy donne le numéro de carrefour.

SADT : Structured Analysis and Design Technics (= technique structurée d'analyse et de modélisation des systèmes).

SAE : Système d'Aide à l'Exploitation pour les transports publics.

SAGE/SAIGE : Système d'Aide (Intelligent) à la Gestion des Embouteillages.

Sas : zone située entre une boucle magnétique et le feu qui lui est immédiatement aval.

Saturation (congestion) : une entrée de carrefour est saturée lorsque la totalité des véhicules en attente pendant la durée d'un cycle n'est pas écoulée pendant la phase de vert suivante.

SCATS : Sydney Coordinated Adaptive Traffic System.

SCOOT : Split, Cycle, and Offset Optimization Technique.

SETRA : Services d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes.

Situation inhabituelle :

est considérée comme "situation inhabituelle" une situation qui s'éloigne de la situation attendue. Ces situations inhabituelles peuvent être de trois types :

* Les anomalies accidentelles proprement dites.

* Les défauts capteurs.

* Les déséquilibres, c'est-à-dire par exemple lorsque soudainement sur un cycle et sans raison apparente, 80 % des véhicules ont tourné à droite alors que généralement seuls une trentaine de % le font. Ce type de situation n'est pas systématiquement lié à une anomalie.

SR : Système de Régulation.

STE (pricing) : Système de Tarification Electronique de la Voirie.

Temps de sécurité : période durant laquelle aucun feu n'est au vert sur le carrefour. Il y en a au moins deux par cycle.

TO : Taux d'Occupation (*occupancy rate*) : pourcentage de temps d'occupation d'une zone de la chaussée par un véhicule.

TRANSYT : TRAffic Network StudY Tool.

TRL / TRRL : Transport Research Laboratory / Transport and Road Research Laboratory.

UTCS : Urban Traffic Control System (= système de régulation du trafic urbain).

UTOPIA : Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation.

ZELT : Zone Expérimentale Laboratoire de Toulouse.

 : Certaines définitions proviennent des documents suivants :

- Ville de Paris : la régulation des feux de signalisation - *Ville de Paris*, octobre 1987.
- P. Glare & P.H. Bovy - Nouvelles techniques de régulation des carrefours - *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, département de génie civil*, septembre 1988, pp. 20-21.
- P. Briquet - Annexe 3 "Glossaire anglais-français utilisable en ingénierie du trafic" extrait de Grandeur et servitudes de PATRICIA ou la visionique appliquée au trafic routier et urbain - *LCPC*, Paris, 1990.
- Régulation du trafic routier : terminologie PROJET DE NORME FRANCAISE.



UNIVERSITE DE NANCY I

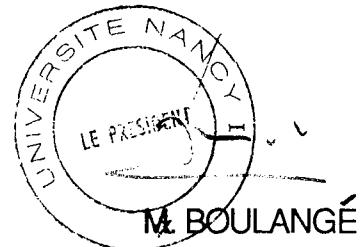
NOM DE L'ETUDIANT : Monsieur THIRIET Jean-Marc

NATURE DE LA THESE : DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I
en AUTOMATIQUE

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER

NANCY, le - 5 FEV. 1993 n° 65

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE DE NANCY I





D 095 066163 8

CONTRIBUTION TO THE ANOMALIES DETECTION AND ANALYSIS IN THE URBAN FIELD OVERVIEW ON URBAN TRAFFIC CONTROL

The first part is concerned with a state of the art in the field of urban traffic control. A recall of main technics used in micro and macro-control is done followed by a classification of macro-control strategies. Then several reflections are developed which bring us to propose a future system. This system would integrate control, guidance and localization functions. With the help of the SADT method (IDEF0), we propose a comparison of functions used by a policeman controlling flows at a junction and an urban traffic control system (UTCS). This comparison gives us the ability to display their respective insufficiencies.

The second part deals with urban anomalies detection, localization and analysis. First we recall what is a traffic anomaly and the way it is revealed. Then we choose a test zone to make acquisition campaigns ; this zone is an important junction in the city of Nancy (Lorraine). Two procedures have been used concurrently for the modelling of the beginning of an anomaly.

The first procedure is based upon the study of macroscopic parameters, especially traffic flows, and tries to define a model for estimating exiting flows from entering ones. Several models have been tested. Their advantages and disadvantages are discussed under the assumption of real time detection and analysis.

In the second stage, we observe traffic flows through a "stroboscopic" window synchronized on traffic signal evolutions. This method consists in deconvolving macroscopic parameters into several microscopic ones which represent actual users behaviour. It is possible by this way to analyse anomalies in determining their beginning, their end and consequently, their duration.

KEYWORDS :

urban traffic control state of the art - congestion - real time - dynamic modelling - defaults - SADT - traffic control strategies - sensors - macroscopic parameters - microscopic parameters - traffic flows - occupancy

CONTRIBUCION A LA DETECCION Y LA ANALISIS DE ANOMALIAS DE TRAFICO EN EL MEDIO URBANO MIRADA SOBRE LO EXISTENTE EN REGULACION DEL TRAFICO URBANO

La primera parte concierne una mirada sobre el dominio de la regulación del tráfico urbano. Una llamada de las principales técnicas utilizadas en microregulación y macroregulación es efectuada seguida por una clasificación de las estrategias de macroregulación. Varias reflexiones desarrolladas traen una propuesta de un sistema para el futuro que podría reagrupar las funciones de regulación, de guía de los coches y de localización. Con la ayuda del método SADT (IDEF0), comparemos las funciones de un policía de tráfico en una encrucijada y un sistema de control del tráfico urbano. Esta comparación permite de mostrar su insuficiencias respectivas.

La segunda parte trata de la detección, de la localización y de la análisis de anomalías de tráfico. Después de haber llamado que es una anomalía del tráfico y la manera que ésta se manifiesta, una zona es definida para efectuar medidas. Esta zona es una encrucijada estratégica de la ciudad de Nancy (Lorraine). Dos diligencias fueron adoptadas paralelamente para modelizar la aparición de una anomalía.

La primera diligencia es basada sobre el estudio de las variables macroscópicas, es decir el flujo del tráfico (número de coches), y propone un modelo que estima los flujos saliendo a partir de los flujos entrados. Modelos diferentes fueron testados. Su ventajas como su inconvenientes están analisados con la hipótesis de una detección y una análisis de anomalías en tiempo real.

En la segunda diligencia, observamos el tráfico a través de una ventana "estroboscópica" sincronizada sobre la evolución de los ciclos y de las fases de los semáforos. Es como una deconvolución de las variables macroscópicas en varias variables microscópicas. Ellas son una representación del comportamiento de los utilizadores. Demostramos que es posible con este método de analizar una anomalía por la determinación de su principio, de su fin y consecuente, de su duración.

PALABRAS CLAVES :

Regulación del tráfico urbano - saturación - tiempo real - modelización dinámica - defectos - SADT - estrategias para la regulación del tráfico - detectores - variables macroscópicas - variables microscópicas - flujo del tráfico - ocupación

CONTRIBUTION A LA DETECTION ET A L'ANALYSE D'ANOMALIES DE TRAFIC EN MILIEU URBAIN

REGARDS SUR L'EXISTANT EN REGULATION DU TRAFIC URBAIN

La première partie est consacrée à un état de l'art dans le domaine de la régulation du trafic urbain. Un rappel des principales techniques utilisées en micro et macro-régulation est effectué suivi d'une classification des stratégies de macro-régulation. Diverses réflexions amènent ensuite à une proposition de système futur qui pourrait intégrer les fonctions de régulation, de guidage et de localisation. A l'aide de la méthode SADT (IDEFO), une comparaison est effectuée entre les fonctionnalités mises en œuvre par un gardien de la paix qui assure la circulation et un système de régulation du trafic urbain, ce qui permet de mettre en évidence leurs insuffisances respectives.

La seconde partie traite de la détection, de la localisation et de l'analyse d'anomalies de trafic. Après avoir rappelé ce qu'est une anomalie de trafic et la façon dont elle se manifeste, une zone-test est définie pour effectuer des mesures. Cette zone est un carrefour stratégique de Nancy (Lorraine). Deux démarches ont été adoptées parallèlement pour modéliser l'apparition d'une anomalie.

La première démarche est basée sur l'étude des variables macroscopiques, essentiellement les débits, et propose un modèle qui estime les débits sortants du carrefour en fonction des entrées. Différents modèles ont été testés. Leurs avantages et inconvénients sont analysés dans une hypothèse de détection et d'analyse d'anomalies en temps réel.

Dans la seconde démarche le trafic est observé à travers une fenêtre "stroboscopique" synchronisée sur l'évolution des cycles et des phases des feux tricolores. Celle-ci peut être assimilée à une "déconvolution" des variables macroscopiques qui conduit à appréhender les paramètres microscopiques représentatifs du comportement des usagers. Il est possible par cette méthode d'analyser les anomalies en déterminant leur début, leur fin et par conséquent leur durée.

MOTS-CLEF :

Etat de l'art en régulation du trafic urbain - saturation - temps réel - modélisation dynamique - défauts - SADT - stratégies de régulation du trafic - capteurs - variables macroscopiques - variables microscopiques - débit - occupation

BEITRAG ZUM ERKENNEN UND ANALYSIEREN VON UNREGELMÄßIGKEITEN IM INNERSTÄDTISCHEN VERKEHR

ÜBERBLICK ÜBER BISHER BESTEHENDE FORMEN DER VERKEHRSREGELUNG

Der erste Teil der Arbeit befaßt sich mit dem Entwicklungsstand auf dem Gebiet der städtischen Verkehrsregulierung. Einer Darstellung der grundsätzlichen Techniken, welche in der Micro- und Macro-Regulierung verwendet werden, folgt eine Klassifikation der Strategien des Macrobereiches. Danach sind verschiedene Überlegungen entwickelt worden, die auf einen Vorschlag für ein zukünftiges System hinauslaufen, in welchem die Funktionen der Regulierung, Leitung und Lokalisierung eingebunden sind. Mit Hilfe der SADT-Methode wurde ein Vergleich zwischen der Wirksamkeit zweier Systeme, dargestellt durch einen Polizeibeamten, welcher den Verkehr von Hand regelt, und einem System zur Regulierung des städtischen Verkehrs, erstellt, welcher die beiderseitigen Unzulänglichkeiten sichtbar macht.

Der zweite Teil der Arbeit behandelt das Erkennen, Lokalisieren und Analysieren von Unregelmäßigkeiten im Stadtverkehr. Nach dem Darlegen, was man unter Unregelmäßigkeiten des städtischen Verkehrs versteht und der Art und Weise wie sie sichtbar werden, wurde ein Testbereich zum Durchführen von Messungen festgelegt. Hierbei handelt es sich um eine strategisch wichtige Kreuzung in Nancy (Lothringen). Zum Erkennen von Unregelmäßigkeiten wurden im parallelen Einsatz 2 Möglichkeiten zum Analysieren und Modellisieren des Verkehrsflusses verwirklicht.

Die erste Möglichkeit basiert auf dem Analysieren der Makrovariablen, insbesondere der Durchsatzmenge, und beinhaltet ein Modell, welches den Durchsatz der die Kreuzung verlassenden Fahrzeuge in Abhängigkeit der in den Kreuzungsbereich einfahrenden Fahrzeuge abschätzt. Verschiedene derartige Modelle wurden getestet und ihre Vor- und Nachteile, unter Beachtung der Echtzeit-Anforderungen, in Bezug auf die Erkennung und Analyse von Unregelmäßigkeiten ausgewertet.

Die zweite Möglichkeit überwacht den Verkehr durch ein "Stroboscop-Fenster", welches auf die Entwicklung des Verkehrsstromes innerhalb der Freigabezeit der Ampelzyklen synchronisiert ist. Dieses Verfahren kann mit einem Aufsplitten der Macro-Variablen in ihre grundlegenden Anteile (Deconvolution) verglichen werden, was zu einem Erfassen von Micro-Parametern, die das Verhalten der Verkehrsteilnehmer representativ wiedergeben, führt. Es wird gezeigt, daß es mit dieser Methode möglich ist, Unregelmäßigkeiten zu analysieren, in dem man ihren Anfang, ihr Ende und daraus schlußfolgernd ihre Dauer bestimmt.

SCHLÜSSELWÖRTER :

gegenwärtiger Zustand der innerstädtischen Verkehrsregelung - Stauungen - Echtzeitbehandlung - dynamische Modellierung - Fehlererkennung - SADT - Strategie für die Verkehrsregelung - Sensoren - Macrovariablen - Microvariablen

See previous page for English version of title, abstract and keywords.

La versión española del título, del resumen y de las palabras claves está disponible en la página precedente.