

République Algérienne Démocratique & populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique



**THÈSE**

Présentée pour obtenir le grade de

**DOCTEUR**

de

**L'université 8 Mai 1945 Guelma**

Filière: Automatique et informatique industrielle

Spécialité : Automatique, informatique industrielle et traitement de signal

Présentée par

**BOURIACHI Fares**

---

**Contribution à la modélisation et à la commande du trafic  
urbain : Application à la ville de Guelma**

---

Directrice de thèse : Dr KECHIDA Sihem

Devant le jury d'examen composé de :

TEBBIKH Hicham	Professeur, Université de Guelma	Président
KECHIDA Sihem	MCA, Université de Guelma	Encadreur
MOSTEFAI Mohammed	Professeur, Université de Sétif	Examinateur
FARHI Nadir	Chargé de recherche de IFSTTAR-Paris	Examinateur
KARA Redouane	M.C.A, Université de Tizi Ouzou	Examinateur

2017

# Contribution à la modélisation et à la commande du trafic urbain : Application à la ville de Guelma

## Résumé

Au cours de ces dernières années, l'Algérie a connu une explosion énorme dans le parc national d'automobiles, de plus l'incapacité de la plupart des villes à supporter tous ces véhicules a provoqué plusieurs problèmes de circulations (bouchons, files de circulation, congestions, ...etc.). Pour faire face à ces situations contraignantes, on fait appel soit à une étude globale de l'infrastructure pour l'aménagement urbain, soit à la recherche des solutions innovantes dans le domaine de la surveillance et de la régulation améliorant à cet égard la mobilité en agglomération. Les travaux présentés dans cette thèse se situent dans la cadre des Systèmes de transport Intelligents (STI) et s'intéressent aux problèmes de commande du trafic urbain via le développement d'un modèle adéquat. Nos travaux visent principalement le contrôle la circulation au niveau des intersections adjacentes de l'aire Guelmoise.

L'idée consiste à rapprocher le comportement du trafic à un modèle hybride puis à rechercher un plan de coordination optimal des feux de signalisation pour le contrôle du flux. La démarche utilise conjointement deux représentations hybrides : les réseaux de Pétri hybrides et les automates hybrides. L'intérêt de ce couplage est de bénéficier des avantages des deux modèles permettant ainsi d'aboutir à un modèle d'Automate Hybride Rectangulaire (AHR) imitant tous les aspects importants de la dynamique des flux de trafic où les phénomènes de sursaturation sont illustrés par des sommets interdits.

Après avoir effectué une analyse d'atteignabilité pour vérifier ce modèle, une stratégie de contrôle est élaboré pour générer un plan optimal des feux de trafic où de nouvelles contraintes sont imposées pour éliminer ces sommets interdits. La synthèse consiste à limiter l'espace de variations des variables continues (flux). Le contrôle est alors obtenu par modification des dates d'occurrence associées aux transitions correspondant aux temps des feux. Les résultats de comparaison montrent que l'approche de contrôle proposée surpasse ceux obtenus par le logiciel d'optimisation de synchronisation de signaux SYNCHRO en termes de débit total et de rapport moyen volume/capacité.

Dans cette optique, nos contributions peuvent se décliner en ces points :

- Proposition d'un modèle hybride à base d'un réseau de Pétri hybride D-élémentaire pour la description de deux intersections adjacentes du trafic urbain;
- Construction du modèle automate hybride rectangulaire par la traduction du modèle Réseau de Petri hybride D-élémentaire développé;

- Conception d'une nouvelle approche de commande de feux de trafic basée sur le modèle hybride combiné;
- Validation des résultats via un ensemble de simulations avec des données réelles de la ville de Guelma.

**Key words : Automate hybride, Réseau de Pétri hybride, Modélisation du trafic urbain, commande des feux de trafic, phénomène de sursaturation**

# Contribution to modeling and control of urban traffic: application to the Guelma city

## Abstract

During recent years, Algeria knew an explosive growth in national fleet of cars. Moreover, the inability of most cities to support all these vehicles caused several traffic problems (jams, queues, congestion, etc.). In order to deal with these binding situations, we appeal either a comprehensive study of infrastructure for urban planning or a search for innovative solutions in the surveillance and control field improving mobility in conurbations.

The works presented in this thesis lie in the framework of Intelligent Transport Systems (ITS) and are interested to problems of urban traffic automatic control via the development of an appropriate model. Our works aim mainly on traffic control at the adjacent intersections of the Guelma area. The idea is to bring the behavior closer of the traffic to a hybrid model and then to look for an optimal coordination plan of the traffic lights in order to control the flow. The initiative uses two hybrid representations : hybrid Petri nets and hybrid automata. The interest of this coupling is to profit from the both models advantages, thus allowing achieve a Rectangular Hybrid Automaton (AHR) model which capture important aspects of the traffic flow dynamics where the phenomena of oversaturation are illustrated by the forbidden locations.

A reachability analysis is performed to check this model. Indeed, to generate an optimal plan with coordinated traffic lights, a control strategy is elaborated under imposed new constraints for eliminate the forbidden locations. Synthesis consists to limit variation space of continuous variables (flow). Control is then obtained by change of occurrence dates associated to transitions corresponding to timing lights. The experiment results are compared with those from signal timing optimization softwareSynchro. Simulation results affirm the improvement and the effectiveness of the proposed approach in terms throughput vehicle number and the average volume-to-capacity ratios.

In this regard, our contributions can be framed into these points :

- Proposition of a Hybrid Model based on a D-Elementary Hybrid Petri net describing two adjacent intersections of urban traffic ;
- Building of the rectangular hybrid automaton model by translating the developed model of the D-Elementary Hybrid Petri nets ;
- Design of a new control approach based on the combined hybrid model ;
- Validation of the results using a set of simulations with real data from the Guelma city ;

**Key words : Hybrid Automata, Hybrid Petri net, traffic modele, traffic signal control, oversaturated traffic condition**

# المساهمة في النمذجة والتحكم في حركة المرور الحضري : تطبيق بمدينة قالمة

## ملخص-

عرفت الجزائر، خلال السنوات الاخيرة ، تزايد سريع و مذهل للمركبات في الحظيرة الوطنية للسيارات. بالإضافة، لعدم قدرة معظم المدن لاستيعاب جميع هذه المركبات تسبب في العديد من المشاكل المرورية (إختناق , طوابير، ازدحام، إلخ). لمواجهة هذه الوضعية المقلقة، يسعى المهتمون لتحسين و تنظيم حركة المرور والنقل الحضري بالكتل العمرانية. وذلك عبر دراسة شاملة للبنية التحتية للتخطيط الحضري أو عن طريق البحث عن حلول جديدة في مجال المراقبة و التحكم .

تندرج أعمال هذه الأطروحة في إطار أنظمة النقل الذكية (ITS) وتهتم لمشاكل التحكم حركة المرور الحضري وذلك من خلال تطوير نموذج مناسب. وتهدف أعمالنا أساسا لمراقبة حركة المرور عند التقاطعات المجاورة للمنطقة قالمة. وتتمحور الدراسة في ايجاد نموذج هجين لتمثيل سلوك حركة المرور ثم البحث عن خطة تنسيق مثلى للإشارات المرورية من أجل التحكم في تدفق.

تستخدم هذه المبادرة اثنين من تقنيات التمثيل الهجين: شبكات بيتري الهجينة (HPN) و مشغلات الية الهجينة أو الباردون الهجين (HA). و يهدف هذا الاقتران للاستفادة من مزايا كلا النموذجين على حد سواء، و المتمثلة في قوة نمذجة HPN و قدرة تحليل لنموذج HA . و كنتيجة اولية فإن النموذج المشترك "مشغلات الية هجينة مستطيلة" (AHR) المكون من وسائط يعكس وضعية التدفق لنظام المرور حيث تظهر حالات التشبع ممثلة بوسائط ممنوعة.

بعد التحقق من النموذج عبر تحليل "reachability", نقوم بوضع استراتيجيات للتحكم مع فرض قيود جديدة لأجل القضاء على وسائط ممنوعة.

وترتكز هذه المنهجية على الحد من مساحة التغيير للمتغيرات المستمرة (تدفق) حيث يتم التحكم عن طريق تغيير مواعيد حدوث المرتبطة بالانتقالات الموافقة لمدة الأضواء. ولتحقق من المنهجية المقترحة، قمنا بمقارنة للنتائج في ظل سيناريوهات الطلب مختلفة حيث تبين تفوق مميز لنتائج هذه المنهجية على نتائج برنامج Synchro وذلك من حيث التدفق الخارج ومتوسط نسبة الحجم على القدرة الاستيعاب.

وفي هذا الصدد، يمكن صياغة مساهماتنا في النقاط التالية:

- اقتراح نموذج هجين على أساس شبكة بيتري (D-Elementary HPN) لتمثيل اثنين من التقاطعات المجاورة من حركة المرور الحضري.
- تركيب نموذج هجين "مشغلات الية هجينة مستطيلة" (AHR) عبر ترجمة نموذج للشبكات بيتري الهجين. D-Elementary HPN .
- تصميم منهجية جديدة للتحكم عبر استخدام نموذج هجين مركب.
- التحقق من النتائج باستخدام مجموعة من المحاكاة مع بيانات حقيقية لمدينة قالمة.

**الكلمات الدالة:** نمذجة الحركة المرورية , تحكم في إشارة المرور, شبكات حركة المرور الحضرية, حالة المرور المشبعة , الامثل , شبكات بيتري الهجينة, مشغلات الية الهجينة .

## Remerciement

Le travail de notre thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet TASSILI ( un programme de soutien à la coopération scientifique franco-algérienne pilotée par les tutelles sous la responsabilité du Comité Mixte d'Évaluation et de Prospective (CMEP), composé d'experts des deux pays et de deux co-présidents) en collaboration entre le laboratoire LAIG de Guelma, Algérie et Gipsa-Lab de Grenoble, France portant sur la gestion du réseau de trafic de la ville de Guelma, situé à l'Est de l'Algérie. A cet occasion je remercie les chefs du projet TASSILI en l'occurrence le Pr Alla Hassane chef de projet du côté Français de m'avoir bien accueilli à Gipsa-lab université de Grenoble, durant mes années de formation et le Pr Tebbikh Hicham chef de projet de côté Algérien qui n'a ménagé aucun effort durant tout le long du déroulement de la thèse et d'avoir consenti d'être mon rapporteur de thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent particulièrement à mon encadreur Dr Kechida Sihem qui a, non seulement dirigé ce travail mais n'a épargné aucun effort pour que je puisse préparer ma thèse dans de bonnes conditions. Je tiens aussi, à lui témoigner mon admiration pour ses hautes qualités pédagogiques et humaines. Elle m'a encouragée et épaulée. J'ai toujours bénéficié de ses connaissances, de son expérience et de sa perspicacité pour mener à bien ce travail. J'espère avoir été à la hauteur de votre confiance et soyez assuré de ma très vive gratitude et de mon éternelle amitié. Je n'oublierai jamais votre soutien.

Je remercie Dr Farhi Nadir de m'avoir fait l'honneur de participer au jury et d'avoir fait le déplacement de France .Et aussi de m'avoir invité pour effectuer un stage au sein de son équipe Grettia /Cosys /Ifsttar que je n'ai malheureusement pas pu effectuer pour des raisons purement administratives.

J'exprime également ma réelle gratitude à Messieurs le Pr MOSTEFAI Mohammed et le Dr KARA Redouane pour l'honneur qu'ils m'ont fait d'avoir consentis à être les examinateurs de ma thèse.

# Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Caractéristiques du trafic urbain</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction . . . . .	8
1.2 Les capteur dans l'exploitation du trafic . . . . .	8
1.3 Tour d'horizon sur la modélisation du trafic urbain . . . . .	23
1.4 Description et Terminologies des Système de Trafic Urbain . . . . .	30
1.5 Conclusion . . . . .	36
<b>2 Sur la commande de système de trafic urbain</b>	<b>37</b>
2.1 Introduction . . . . .	38
2.2 La régulation via les feux de signalisation . . . . .	38
2.3 Méthodes de commande en boucle ouverte . . . . .	42
2.4 Méthodes de commande en boucle fermée . . . . .	47
2.5 Méthodes commande à base d'intelligence artificielle . . . . .	58
2.6 Méthodes de commande avec modèle . . . . .	61
2.7 Conclusion . . . . .	66
<b>3 Modélisation et analyse d'un réseau de trafic urbain</b>	<b>68</b>
3.1 Introduction . . . . .	69
3.2 Les réseaux de Pétri . . . . .	69
3.3 Modèle d'écoulement du flux trafic par les réseaux de Pétri hybrides . . . . .	74
3.4 Élaboration d'une nouveau modèle d'un réseau de trafic urbain . . . . .	86

3.5	Analyse de modèle résultant du trafic . . . . .	92
3.6	Conclusion . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Stratégie de commande du trafic</b>	<b>98</b>
4.1	Introduction . . . . .	99
4.2	Spécifications de commande . . . . .	99
4.3	Stratégie de synthèse de commande optimale . . . . .	102
4.4	Tests numériques . . . . .	111
4.5	Conclusion . . . . .	116
	<b>Conclusion générale</b>	<b>119</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>122</b>
4.6	Références . . . . .	123
<b>A</b>	<b>Annexes</b>	<b>I</b>
A.1	Tutorial PHAVer . . . . .	I
A.2	Présentation du logiciel Synchrono . . . . .	VII
A.3	Liste de publication . . . . .	IX

# Liste des figures

1	Différentes actions pour la gestion de la circulation . . . . .	3
1.1	Chaine du recueil de données . . . . .	13
1.2	Boucle inductive . . . . .	15
1.3	Principe de fonctionnement d'une boucle inductive . . . . .	16
1.4	Principe de caméra vidéo . . . . .	18
1.5	(a.) Caméra vidéo installé par notre équipe LAIG au niveau d'intersection à Guelma (b.) Exemple de détection et de comptage de véhicules . . . . .	22
1.6	Tronçon de la route . . . . .	27
1.7	Diagramme fondamental . . . . .	28
1.8	Diagramme schématique d'un réseau de trafic . . . . .	31
1.9	Intersection isolée simple . . . . .	31
1.10	Réseau d'artère . . . . .	34
1.11	Diagramme distance-temps . . . . .	35
1.12	Phénomène de Spillback (de facto red) . . . . .	35
1.13	Phénomène de Starvation . . . . .	35
1.14	File d'attente résiduelle . . . . .	36
2.1	Plan de feu d'une intersection simple . . . . .	39
2.2	Intersection simple . . . . .	45
2.3	Diagramme temps distance d'une artère avec une coordination unidirectionnelle	46
2.4	Organigramme de l'algorithme de commande intervalle-véhicule [Tolba, 2004].	49
2.5	Principes généraux de SCATS . . . . .	55

---

2.6	Synoptique général de l'architecture de régulation de système UTOPIA . . . . .	57
2.7	Exemple d'automate hybride . . . . .	65
3.1	Analogie entre un tronçon de la route et un réservoir hydraulique . . . . .	74
3.2	Diagramme de Greenshields . . . . .	76
3.3	Modélisation d'un tronçon par RdPCC. . . . .	77
3.4	Modèle RdP T-temporisé de feu de signalisation. . . . .	78
3.5	Modèle RdPH d'un tronçon . . . . .	79
3.6	(a) Réseau artériel. (b) Deux intersections adjacentes. . . . .	81
3.7	Diagramme distance-temps de la coordination des feux. . . . .	82
3.8	Modèle RdP T-temporisé de la coordination des feux. . . . .	82
3.9	Représentation schématique des tronçons principales $l_{11}$ et $l_{21}$ dans les deux intersections adjacentes. . . . .	83
3.10	Modèle RdPCC correspondant à deux intersections adjacentes. . . . .	83
3.11	RdPH D-élémentaire modélisant deux intersections adjacentes. . . . .	84
3.12	La partie discrète de modèle RdPH D-élémentaire. . . . .	88
3.13	Automate temporisé équivalent à la partie discrète. . . . .	88
3.14	RdPCC correspondant au marquage discret $[1001]^T$ . . . . .	89
3.15	Automates hybrides modélisant les comportements des RdPCC présenté dans (figure 3.14). . . . .	89
3.16	Forme hiérarchique de l'automate hybride suite à l'application la deuxième étape de l'algorithme. . . . .	90
3.17	Modèle d'AHR pour deux intersections adjacentes . . . . .	91
3.18	Modèle RdPH D-élémentaire de l'exemple . . . . .	94
3.19	Modèle AHR équivalent au modèle RdPH de la figure 3.18 . . . . .	94
3.20	Modèle d'automate atteignable . . . . .	95
3.21	Exemple d'un sommet de l'automate atteignable de la figure 3.20 . . . . .	96
4.1	Automate hybride rectangulaire contraint . . . . .	100
4.2	Structure d'un sommet de l'ACA . . . . .	101

---

4.3	Schéma récapitulatif de principe d'algorithme génétique (AG) . . . . .	109
4.4	Structure d'un chromosome. . . . .	110
4.5	Schéma de la stratégie de commande proposée . . . . .	111
4.6	Carte des willayas de Guelma . . . . .	112
4.7	Présentation de la zone d'étude . . . . .	112
4.8	La configuration géométrie de la zone d'étude. . . . .	113
4.9	Nombre des véhicules dans $l_{11}$ et $l_{11}$ sans et avec l'application de la stratégie de commande proposée . . . . .	114
A.1	L'interface d'entrée de Synchron (version 8) . . . . .	VIII

# Liste des tableaux

1.1	Comparaison entre caméra vidéo/ boucle inductive . . . . .	23
3.1	Les phases de feux actives durant un cycle de temps. . . . .	83
3.2	Flux de trafic de chaque phase. . . . .	85
4.1	les différents scénarios expérimentaux de volume du trafic . . . . .	113
4.2	Plan de feux obtenu par stratégie proposée et Synchron . . . . .	115
4.3	Comparaison des résultats numériques . . . . .	115

# Introduction générale

*« L'esprit scientifique nous interdit d'avoir une opinion sur des questions que nous ne comprenons pas, sur des questions que nous ne savons pas formuler clairement. Avant tout, il faut savoir poser des problèmes. »*

---

La Formation de l'esprit scientifique  
(1938) de Gaston Bachelard

## **Introduction générale**

Avec la croissance rapide de la demande de transport avec la limitation des capacités des infrastructures, la congestion urbaine est devenue l'un des problèmes socio-économiques importants dans la vie des usagers de route dans les villes urbaines, surtout au cours des dernières décennies. Le phénomène de la congestion du trafic est l'un des problèmes les plus préoccupants qui a attiré une grande attention en raison de la crise énergétique mondiale et les soucis environnementaux. En Algérie, les voies urbaines des principales agglomérations connaissent, ces dernières années, une congestion importante et grandissante à cause d'une forte croissance (10% par an) du parc national d'automobile qui s'élève en 2016 à environ de sept (7) millions de véhicules dont six (6) milles dans la ville de Guelma alors qu'en 2003, ce nombre n'a pas dépassé quatre millions. Ce qui explique l'accroissement des demandes en circulation routière; environ 85% des déplacements de personnes s'effectuent par voie routière et 90% du volume des échanges (transport intérieur de marchandises hors transit) sont assurés par le transport routier et par conséquent une augmentation du taux de consommation en carburant équivalant à 25% de la production d'énergie annuelle du pays. En effet, le transport routier engendre beaucoup de nuisances, des embouteillages, des difficultés de stationnement, des accidents et des bouchons quotidiens . . . etc. Cela représente 10 millions d'heures perdues en congestion par an; entraînant un coût de 56 milliards de dinars à cela s'ajoute des pollutions supplémentaires de diverses natures causant de lourdes implications financières pour l'État.

Des différentes stratégies classiques tentent de réduire le phénomène de congestion dans les zones urbaines par la construction de nouvelles infrastructures, l'élargissement des routes très fréquentées, la mise en place des établissements publics de transport urbain et semi urbain et la mise en œuvre des stratégies de transport (par exemple d'optimiser l'utilisation des infrastructures existantes). Cependant, ces solutions sont encore loin pour faciliter une gestion optimale du trafic parce qu'ils sont incapables de répondre à la fluctuation du débit de la demande. A cet effet, la meilleure solution pour la réduction du phénomène de la congestion urbaine sera de rechercher dans la signalisation des feux. Dans la figure 1, nous proposons un schéma récapitulatif des différentes actions pour la gestion de la circulation dans les réseaux routiers urbains.

Généralement, la commande du flux de trafic en zones urbaines et aux centres des agglomérations, consiste à mettre en œuvre des algorithmes de commande afin d'optimiser les cycles des feux de signalisation ou la régulation du trafic en milieu urbain par la commande des feux de signalisation se donne différents objectifs : avant tout assurer la sécurité des vé-

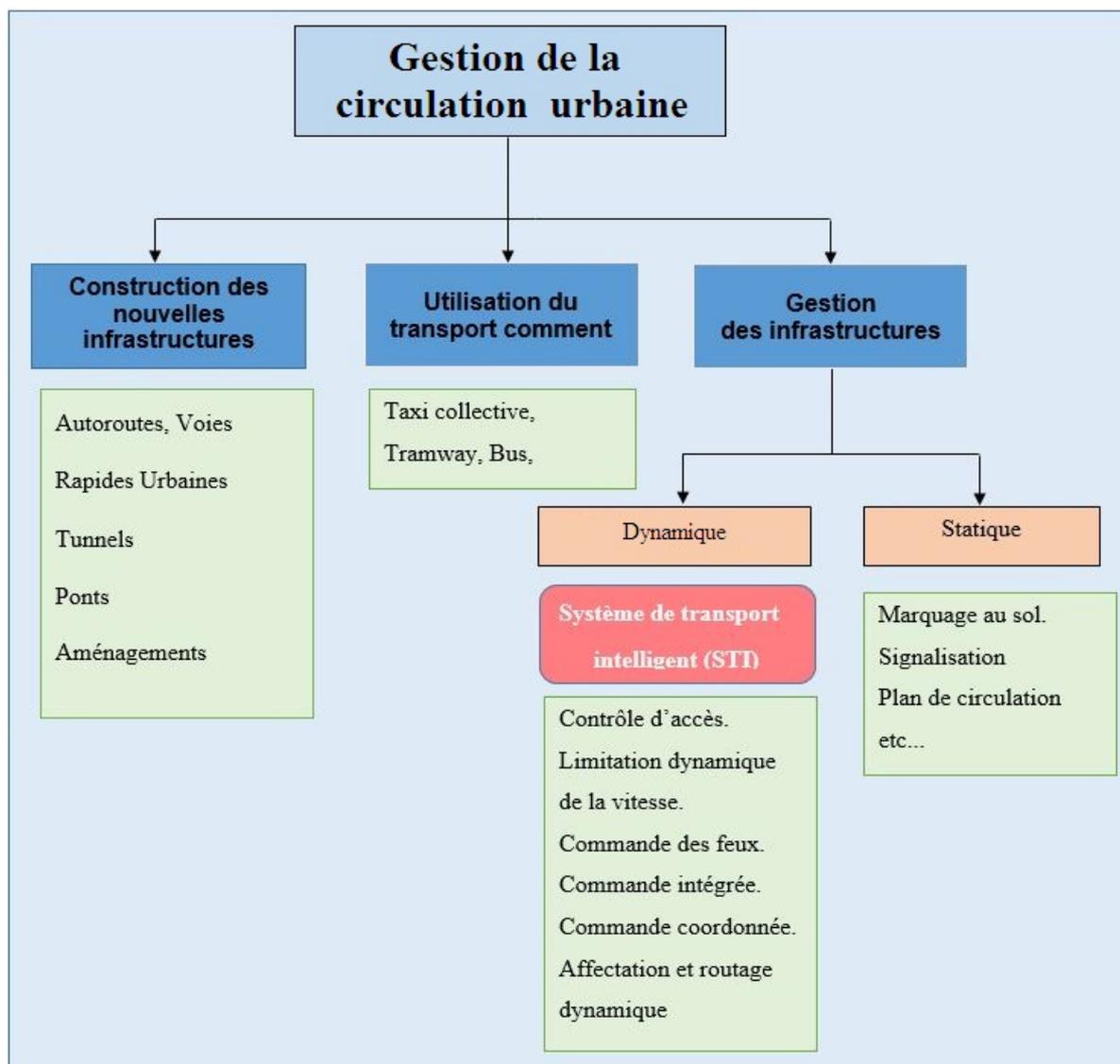


FIGURE 1 – Différentes actions pour la gestion de la circulation

hicules et des piétons sur la voirie, en particulier dans les carrefours où les conflits sont les plus nombreux, mais aussi maîtriser les retards, les congestions, la pollution, le bruit, conséquences d'une augmentation incessante du trafic et enfin, assurer un certain confort.

La conception de lois de commandes impose de disposer d'un ensemble de modèles afin de décrire le comportement complexe du système de trafic. Dans cette optique, le travail présenté dans cette thèse concerne la modélisation et la commande du flux de trafic des réseaux urbains. Donc, l'objectif principal est de proposer de nouvelles approches pour la modélisation et la synthèse de lois de commande optimale simples à employer pour la régulation du trafic urbain.

D'un point de vue modélisation, il n'est largement connu que les modèles macroscopiques, bien qu'ils sont les mieux adaptés pour les problèmes de commande du flux de trafic urbain mais présentent encore plusieurs insuffisances. En effet, ils sont incapables de décrire

les phénomènes locaux ou individuels. Dans [Daganzo et al. 1995] Les auteurs intègrent des modèles de simulation de trafic afin d'obtenir les commandes optimales des feux dans le réseau du trafic urbain sursaturé, Ils ont utilisé diverses présentations de modèles de transmission cellulaire(CTM). La plupart de ces modèles sont issus de la théorie de l'hydrodynamique et considèrent l'évolution de flux du trafic comme un fluide compressible. Or, dans la réalité l'évolution du trafic est plus complexe. Elle est conditionnée par la cinématique de chaque véhicule et ses interactions avec son environnement. Ces interactions peuvent être traduites au moyen des événements décrivant la dynamique des véhicules de manière discrète. Selon ce point de vue, le trafic urbain est considéré comme un système à événements discrets (SED). Partant de ce constat, les exploitants des réseaux du trafic urbain ont fait appel à des outils issus de la théorie des systèmes à événements discrets, entre autres les files d'attente [Heidemann, D., 1996], l'algèbre minplus [Farhi, N., 2008] et les réseaux de Petri discrète [Di Febbraro, A. & Sacone, N., 1998]. Cependant, dans le réseau urbain à grande échelle, le nombre de véhicules est très important, par conséquent, le modèle réseau de Pétri contiendra un grand nombre de jetons, donc, une explosion d'états accessibles constitue une limitation pratique de ce modèle [Alla, H & David, R., 1998a]. Dans ce contexte et afin de surmonter cet inconvénient, des modèles continus sont introduits pour donner un sens global du flux de trafic selon l'approche macroscopique. En effet le système du trafic urbain est un système dynamique complexe possédant un nombre de paramètres important et des interactions complexes de différents types d'actions; l'évolution de flux de trafic et l'écoulement des voitures le long des voies de circulation décrivent une dynamique continue interrompue par l'apparition des événements correspondant aux feux de signalisation. Il s'agit donc d'un système dynamique hybride (SDH) ou l'aspect continu est contrôlé par la dynamique discrète. Dans ce contexte, l'un des points traités dans cette thèse consiste à enrichir les modèles hybrides existants du trafic. L'objectif est de porter un nouveau regard sur l'aspect modélisation de trafic urbain qui introduit un modèle plus fiable afin de mieux comprendre les phénomènes dynamiques de trafic et ses interactions. Les automates Hybrides (AH) [Alur et al. 1995] sont un outil bien connu pour l'analyse et les commandes des SDH. Différentes classes des AH sont utilisées pour la conception et la synthèse du contrôleur pour le système de trafic urbain voir à titre d'exemple les travaux de : [Zhao, X. & Chen, Y., 2003, Sutarto, H & Boel, R., 2010, Chen, Y et al., 2015]. En outre, pour la modélisation du comportement du trafic urbain sous des conditions de sursaturations l'AH n'est pas très recommandé, certaines limitations sont mentionnées ci-dessous :

- En raison de la complexité du comportement de système de trafic urbain, il sera difficile de modéliser tous les comportements possibles, c'est-à-dire qu'il sera pratique-

ment impossible de prévoir tous les modes de fonctionnement dans le formalisme AH.

- Le nombre élevé de variables dans les systèmes de transport augmente considérablement la taille des automates hybrides.

Pour éviter les inconvénients de modélisation des AHs, nous avons utilisé les réseaux de Pétri hybrides (RdPH). Ce modèle est bien adapté pour représenter des systèmes de trafic urbain [Tolba,C., 2004; Di Febbraro, A & Sacco, N., 2004]. Il combine un réseau de Pétri T-temporel et un réseau de Pétri continu. Les RdPH est un des formalismes adaptés pour la modélisation, cependant pour l'analyse et la commande de ces systèmes hybrides on utilise traditionnellement les automates hybrides à cause de leur facilité de manipulation formelle. C'est pour cette raison que nous avons pensé à combiner les avantages des réseaux de Pétri hybrides D-élémentaires à ceux des Automates Hybrides Rectangulaire(AHR) en utilisant un algorithme développé par [Ghomri,L., 2012] permettant le passage entre les deux modèles. Cela permet d'associer la puissance de modélisation des réseaux de Petri hybride à la puissance d'analyse des automates hybride pour aboutir à un modèle combiné de trafic urbain qui sera ensuite utilisé pour la détermination formelle de contrôleur. Le second apport de ce travail consiste à exploiter la puissance du modèle combiné pour la synthèse d'une loi de commande destinée au système de trafic urbain ou une nouvelle approche de commande optimale est proposée afin de garantir une meilleure gestion du système de trafic urbain. Le travail présenté dans cette thèse est structuré en deux parties principales précédées d'une introduction générale finalisée par une conclusion et de perspectives générales.

La première est dédiée à l'état de l'art du domaine du trafic répartie en deux chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons les caractéristiques du trafic urbain, à savoir le rôle des capteurs de mesures de données dans le système de gestion de trafic routier; puis nous passons en revue sur les principaux formalismes de modélisation de flux de trafic et les classifications de modèles existants dans la littérature et à la fin de chapitre nous introduisons quelques définitions liées à la commande des feux de trafic dans définitions conditions.

Le deuxième chapitre s'intéresse d'une manière non extensive aux différentes méthodes de commandes développées dans les domaines de trafic à savoir le contrôle en boucle ouverte et boucle fermée des feux de circulation. L'accent sera aussi mis sur les méthodes de contrôle avec ou sans modèle pour le trafic. Dans notre thèse, nous allons élaborer une approche de commande des feux en incluant un modèle hybride. La dernière partie est consacrée à la présentation des principales contributions liées à la modélisation et à la commande dans le domaine du trafic urbain. Elle détaille en deux chapitres, les différentes démarches adoptées dans la méthodologie proposée. Les résultats de simulation sont présentés en fin de chaque chapitre. Dans le chapitre trois, nous proposons un modèle hybride destiné à

un réseau urbain à deux intersections adjacentes. Après avoir dressé le modèle en RDPH D-élémentaire, nous développons un modèle équivalent en automate hybride rectangulaire (AHR) en s'appuyant sur un algorithme de passage. La principale motivation de cette idée est de conserver les avantages des deux représentations et d'aboutir à un modèle puissant et facile à l'analyse. Le dernier chapitre traite le problème de synthèse de contrôle des deux intersections adjacentes. Une fois les spécifications de commande que l'on souhaite imposer sont définies, nous procédons à l'élaboration de la méthodologie de commande. Une attention particulière est portée aux travaux de [Ramadge, P. & W. Wonham. 1989] qui constituent les travaux fondateurs de la synthèse de commande. De la même manière, nous formulons l'optimisation multi-objective afin de déterminer les solutions optimales en terme de paramètres clé du plan de coordination des feux de circulation.

# Chapitre 1

## Caractéristiques du trafic urbain

*« Va prendre tes leçons dans la Nature »*

---

Léonard de Vinci

## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les caractéristiques du trafic urbain, nous commençons par une synthèse sur ce que les exploitations peuvent attendre de capteurs dans leur métier de gestion du trafic urbain. Deux capteurs les plus usuels sont présentés tels que la boucle inductive et caméra vidéo. Ensuite nous présentons une classification des différents modèles de flux de trafic existant dans la littérature suivie par quelques définitions et terminologie liées au système de trafic urbain.

## 1.2 Les capteurs dans l'exploitation du trafic

Il est important de préciser le contexte dans lequel fonctionnent les capteurs de trafic. En particulier, ils doivent répondre à un certain nombre d'exigences, car ils servent à l'exécution de fonctions d'exploitation du trafic; ils se placent dans un environnement particulier et souvent dans une architecture existante. Dans cette section nous présentons une synthèse sur ce que les exploitants peuvent attendre de capteurs dans leur métier de gestionnaire du trafic.

### 1.2.1 Les paramètres du trafic

Des nombreuses variables sont nécessaires pour décrire le trafic. Dans la suite nous divisons ces variables en deux catégories :

Les variables liées à la dynamique des véhicules considérés individuellement :

- **Espace inter-véhiculaire**

C'est la distance qui sépare, à un instant donné, l'avant des véhicules consécutifs sur la même voie de la route. Les distributions empiriques de cette variable peuvent aussi être approchées par des distributions théoriques à savoir la fonction densité de probabilité de la loi d'Erlang ou de la loi log normale [Cohen, S., 1991].

- **Temps inter-véhiculaire**

C'est la durée entre les instants de passage de l'avant des véhicules successifs par le même point de la route. La mesure de cette variable permet d'analyser la composition du trafic et ainsi d'appréhender les effets produits. Les distributions empiriques des écarts, qui varient selon le type de route, les conditions météorologiques, etc., peuvent être ajustées par

des distributions théoriques connues [Cohen, S., 1990]. En trafic fluide, ces écarts sont généralement approchés par une distribution exponentielle définie par sa fonction densité de probabilité. En trafic plus dense, la fonction densité de probabilité de la loi d'Erlang ou de la loi log normale se révèle mieux adaptée pour l'approximation de ces écarts [Cohen, S., 1990].

- **La vitesse**

La mesure de la vitesse instantanée d'un véhicule enregistrée sur un itinéraire particulier permet de caractériser l'historique temporel de la vitesse [Cohen, S., 1990]. Un tel historique est utile à l'obtention de divers paramètres. Il fournit des indications sur la qualité du trafic. A titre d'exemple il révèle la proportion du temps d'arrêt sur la route. Il s'emploie fréquemment dans l'étude de la consommation de l'énergie et les émissions des véhicules. L'enregistrement des vitesses instantanées en un point de la route, permet de définir une distribution empirique. Cette distribution peut souvent être ajustée selon la loi d'Erlang ou la loi normale [Cohen, S., 1990]. Sur un parcours de durée  $T$ , la vitesse moyenne est définie par :

$$v_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{inst}(t) dt \quad (1.1)$$

où  $v_{inst}(t)$  désigne la vitesse instantanée du véhicule à l'instant  $t$ .

- **L'accélération**

L'accélération instantanée est dérivée du profil de la vitesse par différentiation. Pour tenir compte des bruits liés aux mesures, les valeurs de l'accélération sont obtenues après un lissage des différences successives des vitesses dans un intervalle de temps donné [Cohen, S., 1990]. Sur un parcours de durée  $T$ , l'accélération moyenne est définie par :

$$a_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T a_{inst}(t) dt = \frac{v_{inst}(T) - v_{inst}(0)}{T} \quad (1.2)$$

où  $v_{inst}(t)$  et  $a_{inst}(t)$  désignent respectivement la vitesse et l'accélération instantanées du véhicule à l'instant  $t$ .

Dans un milieu urbain, les profils des accélérations obtenus ont des distributions symétriques indiquant la similarité des phases d'accélération et de décélération [Cohen, S., 1990]. L'accélération est aussi considérée comme le premier indicateur de qualité de la circulation sur une route particulière par l'entremise du bruit d'accélération  $\sigma_a$ . Cette dernière est inhérente au comportement du conducteur, aux caractéristiques de la route et aux conditions du trafic.

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [a_{inst}(t) - a_{moy}(t)]^2 dt \quad (1.3)$$

La valeur du bruit d'accélération croît avec l'encombrement du trafic.

Les variables nécessaires pour décrire le comportement moyen des flots de véhicules sur un tronçon de route donné sont le débit routier, la densité routière et la vitesse moyenne.

- **Le débit routier**

Le débit routier exprime le nombre de véhicules qui passe en un endroit en une unité de temps. En fonction de la méthode de mesure utilisée le débit peut être approximé soit en un point de la route, soit sur une section de la route. Si le nombre de véhicules mesuré par un capteur dans un intervalle  $\Delta t$  est  $n(t)$ , le débit du trafic s'exprime :

$$q(t) = \frac{n(t)}{\Delta t} \quad (1.4)$$

L'unité utilisée pour quantifier le débit routier est véhicules/seconde [veh/s]

- **La densité routière**

La densité routière exprime le nombre de véhicules qui se trouvent sur une section de la route. En utilisant, par exemple, une paire de boucles inductives, on peut la mesurer sur un tronçon. Si le tronçon de la route sur laquelle la densité est mesurée par  $\Delta x$  et le nombre de véhicules qui se trouvent sur cette section est donné par  $n(t)$ , la densité routière s'exprime par le rapport :

$$\rho(t) = \frac{n(t)}{\Delta x} \quad (1.5)$$

Si la densité est considérée pour toute la longueur  $L$  d'un tronçon routier  $\Delta x$  sera remplacé par  $L$ . L'unité utilisée pour quantifier la densité routière est véhicules/mètre [veh/m].

Une alternative de la densité, rencontrée dans la littérature [Kachroo,P. & Krishen, K. 2000], est le taux d'occupation défini par l'intervalle de temps durant lequel le capteur détecte le véhicule. A partir du taux d'occupation  $o(t)$ , la densité routière s'exprime comme le produit entre le taux d'occupation et une constante :

$$\rho(t) = \alpha \cdot o(t) \quad (1.6)$$

La constante  $\alpha$  est déterminée par le nombre de voies d'un tronçon routier ( $\lambda$ ) et la longueur moyenne d'un véhicule ( $l_{veh}$ ).

- **La vitesse moyenne**

La vitesse moyenne du flux routier exprime la moyenne des vitesses des véhicules qui se trouvent sur une section de la route. En pratique, la valeur de la vitesse moyenne est obtenue par la moyenne des vitesses des véhicules passant sur un capteur pour une période de temps fixée :

$$v_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^K v(t_i)}{K} \quad (1.7)$$

où  $K$  est le nombre de mesures de la vitesse dans la période fixée, mesures effectuées pour les véhicules détectés par le(s) capteur(s). la vitesse est déterminée aussi par le rapport entre la densité et le débit :

$$v(t_i) = \frac{q(t_i)}{\rho(t_i)} \quad (1.8)$$

L'unité utilisée pour quantifier la vitesse moyenne du flux routier est mètres/seconde [m/s].

- **Pression routière**

La pression routière est définie comme le rapport entre le nombre de véhicules qui se trouvent sur une section de route et la capacité maximale de cette section :

$$\rho(t) = \frac{n(t)}{C} \quad (1.9)$$

où le nombre de véhicules  $n(t)$  peut être exprimé par l'intégrale de la différence entre le débit de sortie et le débit d'entrée :

$$n(t) = \int_0^t (q_{in} - q_{out}) + n(0) \quad (1.10)$$

La capacité maximale d'une section routière est déterminée par la longueur de la section rapportée à la longueur moyenne d'un véhicule :

$$C = \frac{l}{l_{veh}} \quad (1.11)$$

Au cours de cette thèse, la longueur moyenne d'un véhicule, basée sur les estimations existant dans la littérature, est considérée comme :  $l_{veh} \cong 5m/veh$

## 1.2.2 Les système de gestion de trafic

### ii. Les fonctions de l'exploitation

Rappelons d'abord que l'objectif de l'exploitation du trafic est d'améliorer la qualité de service des infrastructures routières existantes. Il s'agit de trois missions essentielles indiquées comme suit selon [Certu , 2001] :

- **Le maintien de la viabilité**, c'est-à-dire l'ensemble des interventions destinées à maintenir les conditions normales d'utilisation de la voirie ou à les rétablir dans les meilleurs délais;
- **La gestion du trafic**, qui consiste à contrôler et répartir les flux pour une utilisation optimal de la capacité des infrastructure;
- **L'aide aux déplacements**, qui englobe les actions de nature à améliorer le confort et la sécurité des usagers et qui passe par l'information sur les conditions de circulation.

Les besoins en matières de recueil de données dans le domaine de régulation de trafics portent davantage sur le suivi en temps réel des états de circulation par tronçon de voirie ( débit, taux d'occupation, vitesse, file d'attente, concentration, etc ) alors que la gestion d'événements et d'information ont plutôt besoin de données agglomérées et faciles à appréhender (temps de parcours, états de circulation sur un axe, etc) directement utilisables pour les usagers. Les capteurs vidéo de trafic permettent de répondre à tous ces besoins.

### ii. L'architecture des systèmes

Du point de vue général, nous pouvons considérer qu'il existe deux principes architectures physiques envisageables pour un système de gestion de trafic

- **Une architecture centralisée**, comprenant un ensemble d'ordinateurs centraux, qui collectent les donnée en provenance des systèmes fournisseurs (capteurs, station de comptages, etc.), effectuent le traitement des données, élaborent des commandes et les renvoient vers les actionnaires ou diffuseurs (feux de circulation,panneaux à message variables, etc).

- **Une architecture décentralisée**, dans laquelle une partie de l'organe décisionnel est situé localement entre le capteur et l'actionneur « Par exemple, un contrôleur de carrefour peut connaître les plans de feux et agir en fonction des données reçues des postes de mesures, et communiquer avec les contrôleurs voisins et le poste central.

L'architecture centralisée permet de regrouper le processus décisionnel en un point mais nécessite par ailleurs un réseau de communication qui soit capable de supporter un grand flot de données. Quel que soit le type d'architecture, il fait appel à une communication bilatérale entre le système central et chacun des sous-systèmes avec des protocoles qui peuvent être différents.

### 1.2.3 La chaîne du recueil des données

La chaîne du recueil de données comprend les éléments suivants : le capteur, le détecteur, la transmission, et enfin le traitement de l'information ( figure 1.1).

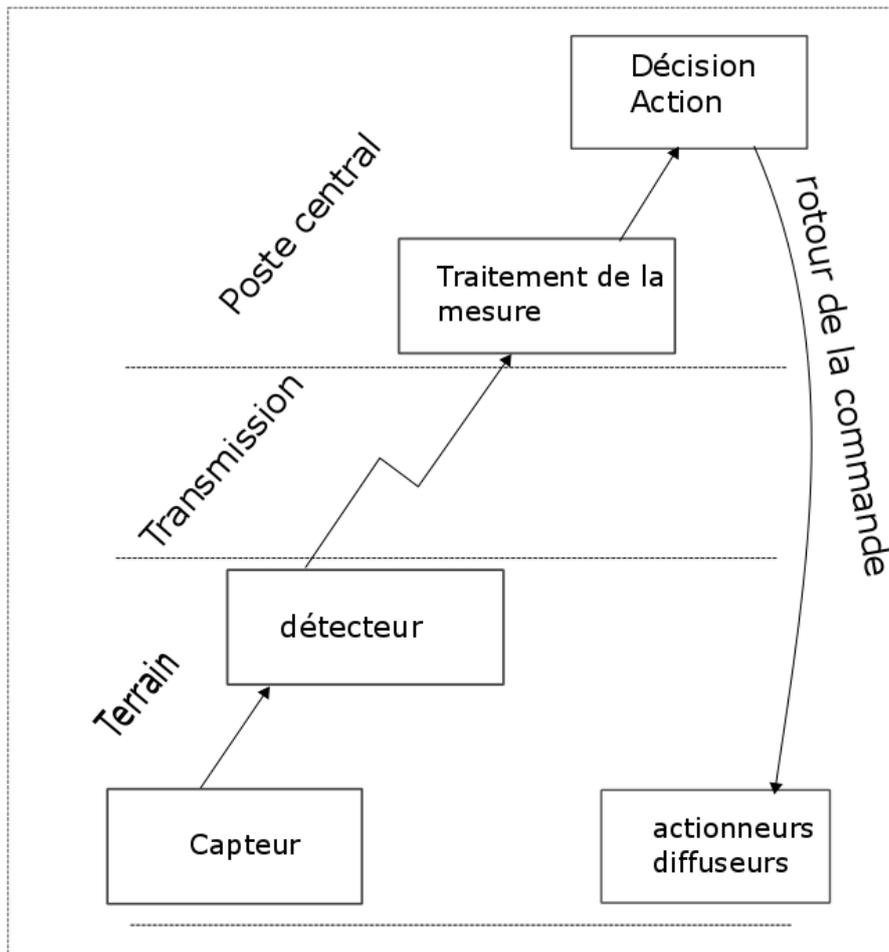


FIGURE 1.1 – Chaîne du recueil de données

Cet chapitre traitant des capteurs vidéo en l'occurrence, le capteur est toujours une ca-

méra vidéo. Dans ce cas, le détecteur est le module de pré-traitement qui réalise l'analyse de l'image. Dans le cas particulier de la vidéo, le pré-traitement du signal peut se faire soit de manière locale, soit de manière centrale. S'il est fait localement, il suffit de transmettre les mesures au poste centrale. Ce qui réduit la charge de communication. S'il y a déjà une transmission du signal vidéo, alors le prétraitement peut se faire à l'abri dans le poste central ou les mesures seront élaborées.

Les principaux choix qu'il faudra faire lors de la spécification d'une configuration pour les transmissions et le traitement des données sont en particulier :

- Traitement décentralisé ou centralisé;
- Déclenchement du recueil par scrutation à partir du PC (solution maître /esclave) ou formules plus asynchrones;
- Acquisition ou location du support de transmission;
- Possibilité de partager la capacité du support avec d'autres services ou opérateurs, publics ou privés;
- Choix du support physique : câble, fibre optique ,radio;
- Architecture du réseau;
- Choix des protocoles de communication;
- Choix du langage de commande;
- Comment assurer la compatibilité avec les équipement existants;
- Traitement des situations dégradées;

#### **1.2.4 Une revue des capteur de trafic usuels**

Les capteurs de trafic les plus usuels sont :

- Tubes pneumatiques et boucles inductives destiné pour les mesures ponctuelles
- Captures vidéo, ultrasons ou radars destiné pour les mesures spatiales :

Au cours des dernières décennies les capteurs utilisés dans l'exploitation de la route ont été essentiellement des capteurs « ponctuels », c'est-à-dire des capteurs observant un point, ou plus précisément une petite section de la chaussée. Le plus connu des automobilistes et le plus voyant, est le tube pneumatique qui permet de détecter le passage des essieux des véhicules. Le plus présent dans les opérations d'exploitation est la boucle inductive. Il est donc naturel pour les exploitants de le citer en référence et de comparer les autres technologie par rapport à ses performances.

Avec le traitement d'images vidéo est apparu un capteur tout à fait nouveau, de type « spatial », c'est-à-dire capable d'observer des longueurs importantes de chaussée et de percevoir simultanément plusieurs véhicules. Ce capteur ouvre des possibilités et des perspectives inédites en matière d'exploitation [Kamata, J. & Oda, T., 1991].

**i. Le capteur ponctuel de référence : la boucle inductive**

Un capteur ponctuel sert à détecter la présence ou le passage d'un véhicule dans sa zone d'action. Le capteur par boucle inductive fonctionne sur ce principe est représentatif de cette catégorie. Les informations contenues dans cette section peuvent s'appliquer à tous les capteurs.

**• Le principe**

Ce dispositif de mesure met en œuvre une boucle inductive ou self constituée de spires de fils de cuivre isolés de section  $\geq 1,5 \text{ mm}^2$ , noyée dans le revêtement de la chaussée et alimentée par un courant alternatif à une fréquence comprise généralement entre 10 et 150 KHz [Certu, 2000].

La boucle peut être préfabriquée ou confectionnée sur place et le nombre de spires est généralement compris entre 3 et 5.

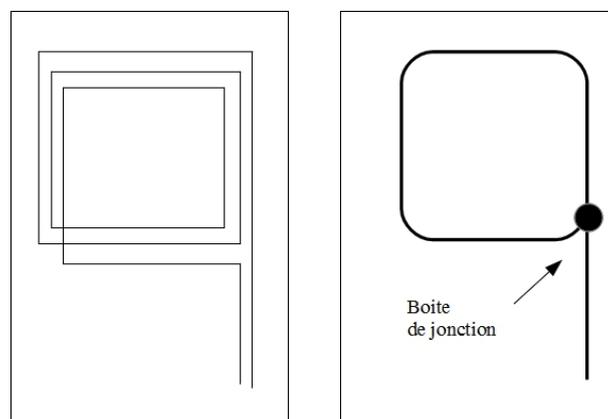


FIGURE 1.2 – Boucle inductive

Quant un véhicule passe au-dessus, le champ électro-magnétique créé par la boucle engendre des courants de Foucault dans la masse métallique du véhicule. Ces courants engendrent à leur tour un champ qui s'oppose au champ qui les a suscités (loi de Lenz) et qui se traduit par une diminution de la self de la boucle. Celle-ci est détectée par des variations de tension, de fréquence ou de phase. Le signal est généralement mis en forme sous forme d'un créneau de tension dont la durée est sensiblement égale au temps de passage de véhicule sur le capteur [Certu, 2000] (Figure 1.3).

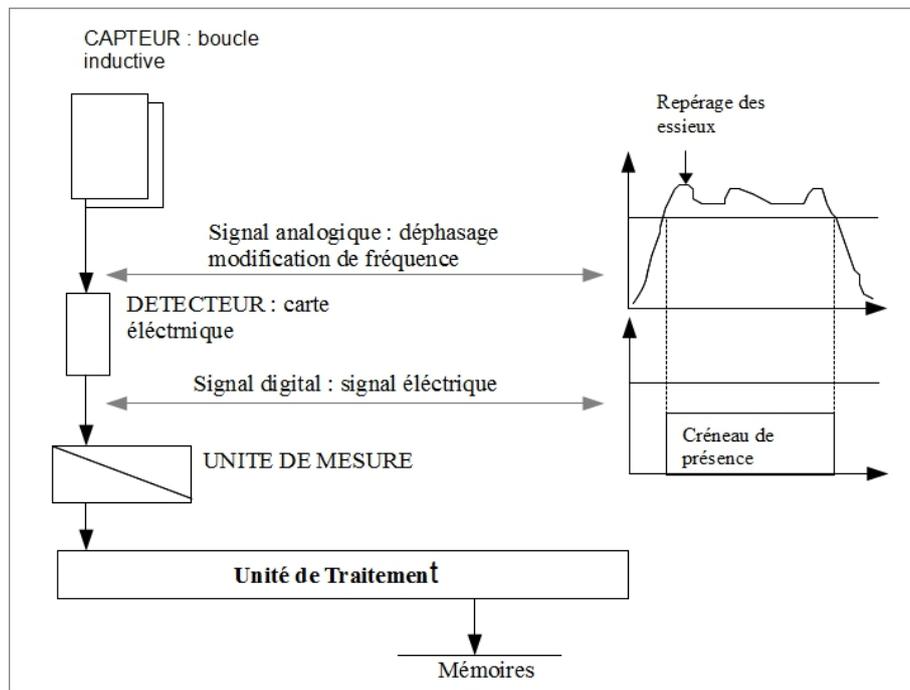


FIGURE 1.3 – Principe de fonctionnement d'une boucle inductive

- **Mesures et utilisations**

Ce capteur, de type intrusif et ponctuel, sert essentiellement à détecter la présence ou le passage d'un véhicule dans sa zone d'action . De cette détection on peut déduire plusieurs mesures[Cohen, S., 1990] : Le taux d'occupation et le débit. En plaçant deux boucles proches l'une de l'autre, l'information obtenue est plus riche, et permet de mesurer d'autres valeurs : La vitesse des véhicules et la longueur des véhicules.

Enfin , en plaçant deux boucles en chevauchement , il est possible de détecter le sens de circulation des véhicules; cette configuration est surtout utilisée en milieu urbain .

- **Avantage**

Ces capteurs sont capables de contrôler le trafic durant toute la journée (jour et nuit). A l'heure actuelle, les boucle inductive sont largement utilisées pour l'exploitation du trafic que ce soit en milieu autoroutier, routier ou urbain. Elles sont utilisées dans :

1. l'analyse de trafic hors-ligne.
2. la régulation du trafic urbain.
3. L'exploitation des route et autoroutes, avec les systèmes d'information routière.
4. le contrôle d'accès.

Le performances des boucles inductives sont : l'erreur sur la mesure de débit est de 3 à 5 % et la taux de panne de l'ordre de 10 à 20 %.

- **Inconvénient**

Comme tous les capteurs ponctuels, il est évident que les boucles ne peuvent fournir de mesures qu'à leur emplacement, l'information n'étant pas spatiale. En conséquence, il est nécessaire d'avoir autant de boucles que de voies de circulation et le choix de la position des boucles peut être délicat, compte tenu de la géométrie du réseau, du comportement des conducteurs, de leurs trajectoires dans les carrefours, etc. Ces phénomènes peuvent dégrader notablement les performances de ces capteurs.

D'autre part, durant les périodes de congestion, la précision du comptage se dégrade du fait que les véhicules sont trop proches les uns des autres et ne peuvent pas toujours être discriminés. En outre si un véhicule est arrêté sur, ou à proximité d'une boucle, suite à un incident, ou pour un motif de stationnement illicite, la mesure résultante n'est pas représentative des conditions de circulation.

De manière générale, les résultats de l'exploitation de trafic dépendent de la précision sur les mesures. Les conséquences de mesures erronées peuvent être très pénalisations pour certaines méthodes automatiques qui les utiliseraient.

- **L'installation et la maintenance**

Le coût d'installation d'une station complète (boucle, électronique de traitement, câbles) représente approximativement dix fois le coût de la boucle, c'est-à-dire de 30 à 50 kF. Une nouvelle installation de boucles est requise à chaque raboutage de revêtement de la chaussée. Lors de ces travaux et parfois pour la maintenance, il est nécessaire de fermer quelques heures chaque voie de circulation, ce qui perturbe le trafic.

D'autre part, il n'est pas toujours aisé de détecter les boucles qui fonctionnent mal. Une bonne maintenance implique au minimum deux contrôles par an.

Il existe d'autres technologies de capteurs ponctuels, dont certaines, dites "non intrusives), ne présentent pas certains des inconvénients propres aux boucles inductives. Citons par exemple :

- **les capteurs à ultrasons**, très utilisés au Japon, parce qu'ils s'installent sur des portiques ou des mâts et évitent des interventions sur la chaussée;
- **les capteurs à infrarouge**, qui possèdent le même avantage, et qui sont utilisés par exemple par le fournisseur privé de services d'information Traffic-Master en Grande-Bretagne;
- **les capteurs micro-ondes** ou **radars** à effet Doppler en faisceaux directifs, plus spécialisés dans la détection de passage et la mesure des vitesses des véhicules, mais qui peuvent également servir à des comptages;

- **les magnétomètres**, nouvellement arrivés sur le marché, moins encombrants et plus faciles à poser que les boucles inductives;

ii. **Les capteurs spatiaux : caméra vidéo**

Ces capteurs permettent de surveiller des zones importantes de chaussée, sur des distances pouvant aller jusqu'à 300 à 400 mètres. Ces capteurs spatiaux utilisent des technologies d'imagerie. Le plus connu actuellement est le capteur basé sur l'analyse d'images vidéo. Ce domaine fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches. Le principe de ce capteur consiste à utiliser une caméra vidéo et à traiter les images fournies par cette caméra afin d'en déduire les paramètres de trafic. L'image vidéo offre des informations d'une grande richesse que seul un opérateur peut appréhender dans leur globalité grâce à une présence permanente face aux moniteurs [Certu, 2000].

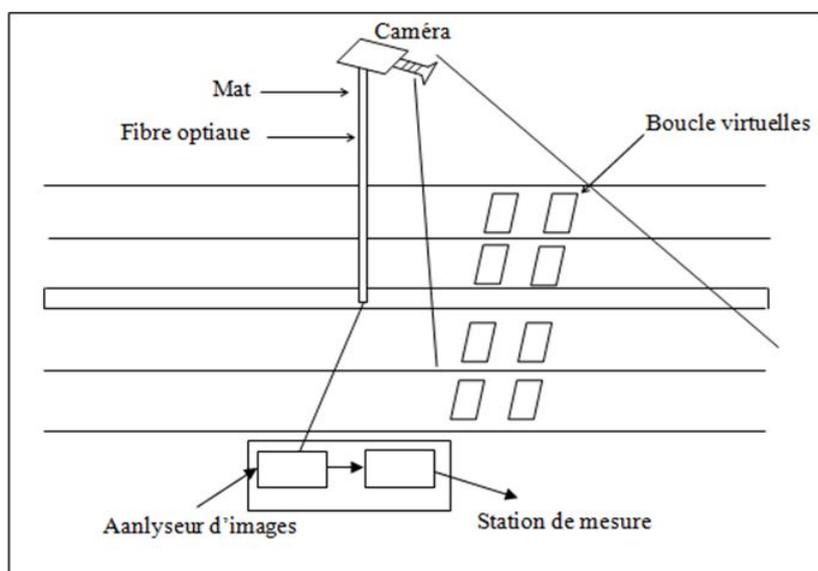


FIGURE 1.4 – Principe de caméra vidéo

- **Description et principe**

Les premières méthodes de traitement d'images utilisées ont consisté à traiter un groupe limité de pixels de l'image. Cette approche permet, en effet, de réduire considérablement le volume de données à traiter. Cela revient à simuler des capteurs analogues aux boucles inductives classiques sur l'image de la chaussée. Plus tard, il a été possible d'analyser le mouvement dans une séquence d'images. Le traitement des images numérisées est relativement complexe et comporte différentes étapes :

1. Élimination des « bruits » par des opérations portant sur le voisinage de chaque pixel;
2. Extraction des objets intéressant l'exploitation ici les véhicules, cette extraction peut se pratiquer image par image par des opérations de type « gradient » permettant de déterminer des contours d'objets. Elle peut également se pratiquer en faisant des différences entre images successives, pixel par pixel (corrélation), ce qui permet de faire apparaître des objets mobiles;
3. Discrimination et mise en forme de ces objets, par exemple par des méthodes de reconnaissance de formes;
4. Suivi de la trajectoire des objets mobiles et détermination de leur vitesse;

- **Types de mesures réalisées**

L'analyse d'image est une technique non intrusive, les capteurs étant placés sur des portiques ou sur des mâts en bordure de chaussée. Elle a l'avantage de se prêter à un grand nombre de mesures, du fait de son caractère à la fois ponctuel et zonal.

Ce capteur peut réaliser les mesures suivantes :

1. Mesure de débit  $Q$ , de vitesse  $V$ , de taux d'occupation  $TO$ , d'intervalles inter véhiculaires, en observant une zone limitée de la chaussée (utilisation de la caméra comme une boucle);
2. Mesure de la densité (ou concentration) du trafic sur une longueur donnée de chaussée;
3. Mesure des mouvements tournants, de changements de voies;
4. Mesure de longueurs de queues à des carrefours, ou dans des péages;
5. Détection Automatique d'incident (DAI) et en particulier, détection de véhicules arrêtés;
6. Détection de piétons.

- **Avantage de la caméra vidéo**

Les capteurs vidéo présentent un certain nombre de propriétés que ne possèdent pas la plupart des autres capteurs ou du moins qu'ils ne possèdent que partiellement, leurs propriétés leur confèrent différents avantages. Il s'agit en effet de capteurs :

1. **De type spatial**; Cette propriété donne à une caméra vidéo la possibilité de remplacer plusieurs capteurs ponctuels : une caméra peut observer couramment 2 ou 3 voies, et mesurer sur chaque voie les différents paramètres du trafic : Q, V, TO; De surveiller en continu de longues portions de chaussée, cette propriété permet d'obtenir des systèmes de DAI beaucoup plus performants qu'avec des capteurs ponctuels; de réaliser des mesures inaccessibles, ou difficilement accessibles aux capteurs ponctuels comme les longueurs de files d'attente; concentration spatiale du trafic; mouvements tournants.
2. **Capteur non intrusif**; L'installation ou les interventions sur les capteurs vidéo ne menacent pas l'intégrité de la chaussée, et dans de nombreux cas, ne créent pas de perturbations pour le trafic, en contrepartie il est nécessaire de leur trouver des supports aériens, si possible d'une grande hauteur, pouvant aller jusqu'à quinzaine de mètres. Dans certains cas ces supports sont disponibles forme de lampadaire de portiques ou de passerelles. Dans d'autre cas, il est nécessaire d'implanter un support, généralement un mât en bordure de chaussée, ce qui à un coût et peut soulever des difficultés pratique ou d'ordre esthétique en milieu urbain, lorsque le support est un lampadaire ou un mât, il peut être nécessaire de déplacer un camion nacelle pour intervenir sur le capteur ce qui contrainte, certains exploitants utilisent des mâts télescopiques ou pliables.
3. **Capteur passif**; Les capteurs vidéo n'émettent pas d'énergie et travaillent avec l'énergie lumineuse naturelle renvoyée par les véhicules. Ils sont par conséquent une faible consommation, et sont plus discrets que des capteurs actifs comme les radars par exemple, Par ailleurs les véhicules ne sont pas les seuls objets à émettre de l'énergie lumineuse, et il est possible de détecter des piétons. En contrepartie, on détecte également tout l'arrière- plan de la route, et les algorithmes de traitement doivent être assez performants pour bien extraire les cibles utiles de leur environnement.
4. **Capteur à haute résolution**; La grande résolution des capteurs vidéo leur confère de grandes potentialités; Possibilité de suivre les véhicules individuellement, en continu; Possibilité de détection des cibles de relativement faibles dimensions : caisse tombée sur la chaussée, piéton, deux-roues; Possibilité de lire les plaques

minéralogiques.

5. **Capteur restituant des images visualisables;** Les capteurs vidéo sont les seuls capteurs à bénéficier de cette capacité de restituer des images visualisables, qui présentent l'intérêt de permettre une vérification instantanée des données fournies. Cette propriété est utile : Pour la validation par les opérateurs du PC des incidents signalés par le système. Pour la surveillance du bon fonctionnement du système d'analyse d'images.

- **Inconvénients de la caméra vidéo**

A côté de ces avantages, il convient de mentionner différents inconvénients :

1. La sensibilité des capteurs vidéo aux phénomènes de masquage. Nous avons vu qu'il était possible de s'en affranchir en grande partie en prenant des précautions sur le positionnement des caméras, mais ces phénomènes entraînent quelques limitations.
2. La difficulté de traiter les nombres portés sur la route ;
3. Les précautions à prendre vis-à-vis de l'ensoleillement ;
4. La nécessité de procéder à des réglages au moment de la mise en route de ces capteurs : désignation des parties de l'image utiles, choix de l'orientation optimale des caméras, etc.
5. Leur coût qui est cependant compensé en grande partie par le fait qu'ils peuvent remplacer de nombreux capteurs des paramètres de trafic, surtout la nuit.

### 1.2.5 Moyens utilisés en Algérie

En Algérie, et en particulier la région de Guelma, le dispositif le plus répandu pour la mesure de certains paramètres du trafic étant les tubes pneumatiques. Les capteurs vidéo urbains sont utilisés pour observer, diagnostiquer et valider une congestion. Les applications d'acquisition de mesures en temps réel sont pratiquement modestes ou presque inexistantes. Ce qui nous a motivé à prendre l'initiative avec l'aide du laboratoire d'installer un équipement (caméra, magnétoscope numérique,.....) permettant d'enregistrer l'état du trafic et d'en extraire l'information nécessaire pour l'estimation des indicateurs du trafic et la commande...etc. La figure 1 représente un essai de mesure effectué à travers une interface réalisé dans le cadre d'un mémoire de Master [Brahmia, N. 2014]. Ce travail consistait à utiliser les outils de traitement d'images pour étudier le comportement de la file d'attente d'un tronçon de la ville de Guelma.



FIGURE 1.5 – (a.)Caméra vidéo installé par notre équipe LAIG au niveau d'intersection à Guelma (b.) Exemple de détection et de comptage de véhicules

### 1.2.6 Comparaison caméra vidéo/boucles inductives

Dans cette sous-section, nous présentons une comparaison entre les deux technologies les caméras vidéos et les boucles inductives :

TABLEAU 1.1 – Comparaison entre caméra vidéo/ boucle inductive

Technologie	Caméra vidéo	Boucle inductive
Mesures possibles	Simultanément, sous réserves de définition des fonctions logicielles adéquates pour le traitement d'image & limité : comptage, débit, taux d'occupation, vitesse	Illimité : comptage, débit, taux d'occupation, vitesse
Détection événement	Zone de détection importante, levée de doute pour vidéo	Pas de manière simple
Précision, taux de détection	Paramétrage nécessaire et délicat Mais en continuelle progression	Le détecteur est souvent un point faible
Fausses alarmes, contrôle	Levée de doute pour vidéo surveillance	On travaille « en aveugle » seul l'ordre de grandeur des résultats permet de suspecter des « rebonds » ou blocages de détecteurs.
Facilités d'installation	N'entrave pas les exploitations de la route le problème de supporte et de raccordement difficulté à régler	L'installation passe par des entreprises spécialisées neutralisation de la circulation
Fiabilité	Fiabilité durable	Fiabilité moyenne
Sensibilisé à la perturbation	Brouillard, ombre des véhicules, occlusion, bougés de caméra, soleil	Sensibilité à l'environnement électromagnétique, problème de stationnement sur la boucle, de la différenciation des files, chevauchement des zones
Conditions de maintenance	N'entrave pas l'exploitation de la route	En « tout ou rien » boucle détruite à chaque réfection de chaussé ou autres travaux sur la voirie
Coût d'exploitation et de maintenance	Peu de maintenance à part de nettoyage des boitiers. Manque de recul pour une appréciation à long terme	Exploitation et maintenance connues par les services techniques
Coûts d'achat et d'installation	Prix en baisse « concurrence s'impose »	Couté de génie civil (queue de boucle parfois très importante)

### 1.3 Tour d'horizon sur la modélisation du trafic urbain

L'analyse, la commande et la surveillance du trafic urbain présentent de grosses difficultés au niveau de la modélisation à cause de la complexité de comportement des systèmes de trafic. Cependant, pour contrôler un système de trafic urbain, on a besoin d'un modèle capable d'interpréter et de comprendre tous les phénomènes de trafic dans les différentes conditions, ce qui a poussé les chercheurs à élaborer plusieurs modèles dédiés à l'évaluation, la prévision, estimation, analyse et à la commande.

Ces modèles essayent de traduire les observations et les hypothèses concernant l'évolution du flux de trafic en un langage mathématique constitué des équations différentielles qui représentent les lois de la physique et plus la description est fine plus les modèles deviennent compliqués et leur commande devient plus difficile.

Les premiers modèles du trafic sont apparus dans les années trente par application de la théorie des probabilités pour décrire le trafic routier [Adams W. F, 1936]. D'autres travaux ont étudié des modèles de volume et de vitesse [Greenshields B. D, 1935]. D'autres travaux

s'intéressent au comportement du conducteur [Tustin, A. 1947], [Ellson, D. G. 1949], [Taylor, F. V, 1949].

Dans les années 1950, de nouvelles théories sont apparues et sont utilisées jusqu'à ce jour et font l'objet de plusieurs études. En effet, WARDROP a utilisé la théorie des files d'attente [Wardrop, J.G.,1952], PIPES et CHANDLER ont élaboré les premiers modèles de poursuite [Chandler R.E. Herman R, 1958], LIGHTHILL et WHITHAM en 1955 puis RICHARD en 1956 ont utilisé la théorie de l'hydrodynamique pour simulé le flux de trafic [Lighthill M.J., & Whitham G.B., 1955], [Newell G.E.,1955 ], [Richards P.I., 1956],[11. Webster FV, 1958].

Dans les années 1970, une nouvelle approche, fondée sur l'analogie avec l'écoulement des fluides dans la mécanique des fluides, a été introduite [Whitham G.B, 1974].

Dans les dernières décennies, le trafic routier a connu des développements importants, les chercheurs n'ont cessé d'améliorer les modèles existants ou de proposer de nouveaux modèles, appropriés aux nouvelles conditions de la circulation routière.

Devant ses différents modèles utilisés pour décrire le comportement du trafic,[Hegyi, A. 2004] a donné une classification, pour mettre en évidence les principaux types existants, basée sur les critères suivants :

1. L'interprétation physique dont l'objectif est d'utiliser les équations de la physique pour décrire le système du trafic.
2. Le degré de détail qui permet de distinguer les détails au niveau granulaire.
3. La représentation de processus qui distingue les modèles déterministes et les modèles stochastiques.
4. L'échelle des variables du temps et de l'espace qui évoluent d'une manière continue ou discrète.

En utilisant la méthode déductive pour décrire le système de trafic via des équations mathématiques et le critère du degré de détail, nous pouvons différencier des entités distinctes du trafic et le niveau de description de ces entités dans les modèles d'écoulement. Cela permet d'aboutir aux modèles microscopiques, mésoscopique et macroscopique [A. Hegyi, 2004].

### **1.3.1 Modèles microscopiques**

Un modèle microscopique décrit, à la fois, le comportement spatio-temporel des composants du système (véhicules et conducteurs) et leurs interactions à un niveau élevé de détails. En d'autres termes, les modèles microscopiques ont pour but de :

1. Décrire le trafic d'une façon fine en décrivant le comportement individuel de chaque conducteur;
2. Représenter les interactions entre les véhicules;
3. Analyser le mouvement de l'ensemble des véhicules sur les infrastructures routières;

Bien que ces modèles fournissent des informations très riches sur le trafic, leur exploitation nécessite un temps de calcul très élevé. On distingue dans la littérature deux approches qui représentent les modèles microscopiques :

**i. Modèles véhicule-suiveur**

Les modèles véhicule-suiveur ou modèles de poursuite, sont utilisés pour décrire les systèmes par lequel un véhicule suit un autre. Ces modèles peuvent être classés en trois types : Les modèles de prévention (« safe-distance models ») [Pipes, 1953], les modèles de type stimulus réponse (« stimulus-response models ») [Chandler, 1958] et les modèles psychospatiales (« psycho-spacing models ») [Hoogendoorn, 2011].

**ii. Modèles automates cellulaires**

Les modèles du type automates cellulaires (« Cellular Automata models ») constituent un développement plutôt récent dans la modélisation du trafic routier au niveau microscopique et ils utilisent l'adaptation de modèles de houblonnage de particules pour représenter le mouvement du trafic. En général, dans les modèles de houblonnage de particules, il y a une chaîne unidimensionnelle des cellules, où chaque cellule peut être soit vide soit occupé par une particule. Le mouvement des particules est réalisé par le houblonnage des particules, en se déplaçant d'une cellule à la prochaine selon certaines règles. Pour adapter ces modèles et simuler le trafic routier, chaque véhicule est représenté par une particule et le tronçon de route est décrit par une chaîne successive de cellules, dont chacune peut contenir un seul véhicule. Dans ce contexte, la circulation des véhicules est décrite comme le passage d'une cellule à l'autre, selon des règles bien déterminées.

Le premier modèle du type automates cellulaires utilisés pour simuler le trafic a été proposé par [Nagel, 1998], souvent désigné sous le nom de modèle de NaSch, et depuis lors, plusieurs modifications du modèle ont été présentées [Maerivoet, 2005]. Les modèles d'automates cellulaires ont été également employés pour des applications urbaines du trafic. Plus spécifiquement, le modèle de NaSch a été augmenté pour représenter les phénomènes d'arrêt-et-aller (« stop and go ») du trafic avec le développement du modèle VDR (« velocity dependent randomisation ») [Pottmeier, 2002].

En outre, les modèles d'automates cellulaires ont été utilisés pour des applications d'optimisation des temps d'attente aux feux de circulation [Brockfeld, 2001]. Cependant, la simulation du trafic aux jonctions commandées par sémaophores n'a pas été étudiée à fond [Brillon, 1999]. En particulier, le flux de saturation produit par les versions déterministes et stochastiques du modèle et les implications du paramètre de randomisation du modèle n'ont pas été explicitement identifiées.

### 1.3.2 Modèles macroscopiques

Les modèles macroscopiques décrivent le trafic d'une manière globale comme un flux de véhicule sans égard aux entités composantes. Le système de trafic est représenté d'une façon compacte en utilisant des variables interdépendantes, comme le flux, la densité et la vitesse. Le comportement individuel de chaque véhicule est ignoré. Le modèle macroscopique se base sur deux approches principales :

1. La théorie de file d'attente [Heidemann, D., 1996] où le trafic est quantifié et on s'intéresse uniquement au processus de départ et d'arrivée des véhicules.
2. La théorie de l'hydrodynamique [Lighthill M.J. & Whitham G.B., 1955], [Whitham G.B., 1974] où le trafic routier est assimilé à un fluide compressible de particule tout en négligeant les dimensions des véhicules.

Les modèles macroscopiques représentent des outils importants pour la simulation, la prévision, l'estimation et la conception de stratégies de contrôle. On distingue trois modèles les plus reconnus aujourd'hui pour la modélisation macroscopique, dans ces modèles l'évolution temporelle des grandeurs macroscopiques est représentée par des systèmes d'équations aux dérivées partielles non-linéaires appelés lois de conservation.

#### i. Modèle du premier ordre

La formulation macroscopique de l'écoulement de flux des véhicules a été proposée par Lighthill et Whitham [Lighthill M.J. & Whitham G.B., 1955] et Richards [Richards, 1956]. Le modèle du premier ordre proposé exploite les concepts de base de la théorie de l'hydrodynamique et se base sur la représentation continue, l'équation de conservation et l'équation d'équilibre ou diagramme fondamental

- **Représentation continue**

L'analogie de l'écoulement des flots de véhicules avec les fluides compressibles conduit à considérer la dynamique du trafic comme étant un milieu continu. Sous cette hypothèse, les

variables moyennes de trafic : débit, densité et vitesse sont considérées comme des fonctions continues. Une conséquence de la représentation continue est que la dimension des véhicules est négligée [Kühne, 1991 ; Leutzbach, 1988 ; Payne, 1971 ; Prigogine & Herman, 1971 ; Whitham, 1974]. Donc n'importe quelle section de la chaussée, aussi petite soit-elle, doit contenir une quantité de véhicule [Elloumi, 1996]. Par exemple, supposons que la longueur moyenne d'un véhicule soit de 7,5 m, nous dirons qu'il existe véhicule par mètre.

- **Équation de conservation**

Le trafic correspond au principe de conservation de la masse qu'on peut définir de la manière suivante [Cohen, S., 1990] : la variation du nombre de véhicules sur un tronçon routier  $[x_1, x_2]$  est égale à la différence entre la masse entrant en  $x_1$  et la masse sortante en  $x_2$  durant l'intervalle de temps (figure 1.6).

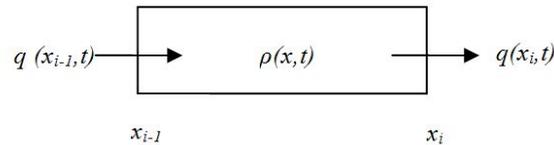


FIGURE 1.6 – Tronçon de la route

$$\int_{x_1}^{x_2} [\rho(x, t_2) - \rho(x, t_1)] dx = \int_{t_1}^{t_2} [q(x_1, t) - q(x_2, t)] dt \quad (1.12)$$

Avec la condition que les variables densité et débit sont des fonctions différentiables, le principe de conservation s'énonce par l'équation de continuité suivante :

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.13)$$

Dans une section de route ayant des rampes d'accès et de sortie, l'équation de conservation devient :

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} = r - s \quad (1.14)$$

où  $r$  et  $s$  sont des termes exogènes d'entrée et de sortie.

La discrétisation temporelle de cette équation dans un intervalle de temps  $[kT, (k+1)T]$  permet d'aboutir à la forme suivante [Lebacque, 1996 ; Buisson et Lesort, 1995] :

$$\rho(k+1) = \rho(k) + \frac{T}{\Delta} [q_e(k) - q_s(k) + r(k) - s(k)] \quad (1.15)$$

où  $\Delta$ ,  $q_e(k)$ ,  $q_s(k)$  et  $T$  sont respectivement la longueur de la section, les débits moyens d'entrée et de sortie à l'instant  $k$  et la période d'échantillonnage.

- **Diagramme fondamental**

La relation entre le débit et la densité routière, peut être formulée par la relation algébrique suivante :

$$q = f(\rho(x, t)) \quad (1.16)$$

Cette relation nous donne le diagramme fondamental du trafic. Ce diagramme est élaboré à partir des données expérimentales [Williams J.C et al. 1985] ou à partir des méthodes mathématiques exprimant la fonction débit-densité et il est utilisé dans la prédiction du comportement d'un tronçon routier ainsi que dans l'analyse, la conception et l'exploitation des infrastructures routières. En général, le diagramme fondamental possède l'allure représentée dans la figure suivante :

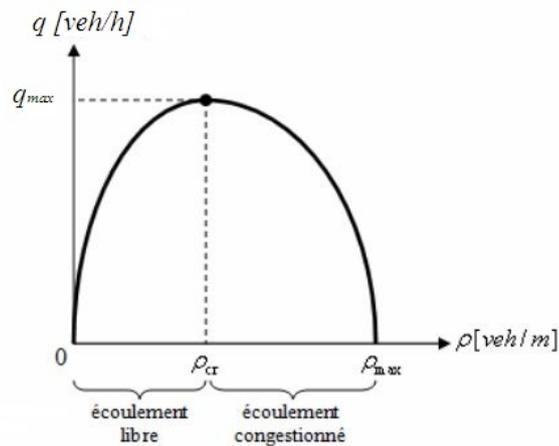


FIGURE 1.7 – Diagramme fondamental

La partie gauche de la courbe correspond à l'état de circulation fluide. Cette situation est facile à interpréter : Les véhicules ne se gênent pas, le débit augmente avec la densité jusqu'à la valeur de densité critique  $\rho_{cr}$ . Le niveau de débit correspondant à cette concentration traduit la capacité de l'infrastructure, c'est-à-dire le débit maximal  $q_{max}$  susceptible d'être écoulé. Au-delà de ce seuil critique, si la concentration continue d'augmenter, le débit se met à régresser. Les véhicules commencent à se gêner les uns les autres et le régime de circulation est dit saturé.

- ii. **Modèle d'ordre supérieur**

Les modèles du premier ordre présentent des inconvénients en particulier au niveau de précision notamment dans certains cas du trafic, à savoir les rétrécissements des autoroutes

ou les convergences avec des rampes d'accès [Papageorgiou M., 1997]. Pour tenter de remédier à ces défauts, des modèles d'ordre supérieur ont été proposés en 1971 par PAYNE. Le modèle de PAYNE est présenté comme une approximation du modèle véhicule-suiveur en prenant en compte le temps de réaction du conducteur après un changement du trafic en aval, (i.e. le conducteur au point de la route ajuste sa vitesse avec un retard relativement à la situation du trafic au point  $x + \Delta x$  avec  $\Delta x > 0$ ). Ainsi la vitesse moyenne est définie par :

$$v(x, t + \tau) = f(\rho(x + \Delta x, t)) \quad (1.17)$$

Par un développement limité à l'ordre 1 de l'équation 1.17 (développement de la partie gauche suivant et de la partie droite suivant ), nous obtenons l'équation dynamique de la vitesse moyenne :

$$\frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = \left[ \frac{1}{\tau} [f(\rho) - v] - v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\mu}{\tau \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right] (x, t) \quad (1.18)$$

Où  $\mu = -0,5 \frac{\partial f(\rho)}{\partial \rho}$  est un paramètre positif.

### 1.3.3 Modèles mésoscopiques

Ces modèles ne s'intéressent pas aux véhicules pris individuellement mais plutôt à des groupes de véhicules (ils décrivent le trafic à un niveau intermédiaire entre les modèles microscopiques et les modèles macroscopiques) où leurs interactions sont décrites à un faible niveau de détail. Dans les modèles mésoscopiques, le trafic est représenté par des groupes de véhicules (entités de trafic) qui ont les mêmes caractéristiques, par exemple, la même origine, la même destination, la même vitesse désirée. Trois types de modèles mésoscopiques existent, les modèles de distribution inter-véhiculaires, les modèles de groupes (clusters) et quelques modèles mésoscopiques qui reposent sur la théorie de la cinétique des gaz.

Les modèles microscopiques et mésoscopiques sont essentiellement utilisés pour la simulation et la planification. Par contre dans l'élaboration de la commande en temps réel, leur utilisation reste très limitée à cause de leur complexité ainsi que leurs caractères non analytiques. Quelques modèles mésoscopiques, les plus souvent rencontrés dans la littérature, seront présentés succinctement dans la suite.

1. **CONTRAM** [Leonard, et al. 1989], représente le réseau routier par des nœuds et des arcs, et les véhicules sur les arcs sont groupés en paquets qui voyagent de l'origine à la destination (à noter que les paquets peuvent être formés à partir d'un seul véhicule).

2. **DYNAMIT** [Ben-Akiva, M et al. 2001], utilise des véhicules individuels se déplaçant le long des segments sur la base des relations vitesse - densité et des modèles des queues d'attente. Les voies sont représentées en détail lorsque des congestions du réseau se produisent et les files d'attente commencent à s'agrandir. Les files d'attente sont spécifiques à chaque voie. Les opérations sur les intersections sont capturées en termes de leur capacité.
3. **DYNASMART** [Jayakrishnan, et al. 1994], utilise aussi la relation vitesse-densité, mais il adopte une représentation plus détaillée pour les intersections signalées (au niveau de la succession de feux de circulation) pour modéliser les retards pris dans ces positions.
4. **FASTLANE** [Gawron, C et al. 1998], représente les véhicules individuellement, répondant aux relations vitesse - densité, et utilise des serveurs stochastiques pour les files d'attente au niveau des noeuds pour justifier les retards dus aux feux de circulation, ainsi que les interactions avec les flux de trafic provenant d'autres directions.

## 1.4 Description et Terminologies des Système de Trafic Urbain

Un Système de Trafic Urbain (STU) est composé d'un réseau de trafic urbain, des règles de fonctionnement, d'un système de gestion et de commande, et d'entités empruntant le réseau. Nous donnons dans la suite tous les définitions et les terminologies liée à chaque composent.

### 1.4.1 Réseau de trafic Urbain

Le Réseau de Trafic Urbain (RTU) est un ensemble d'axes de communications et des intersections.

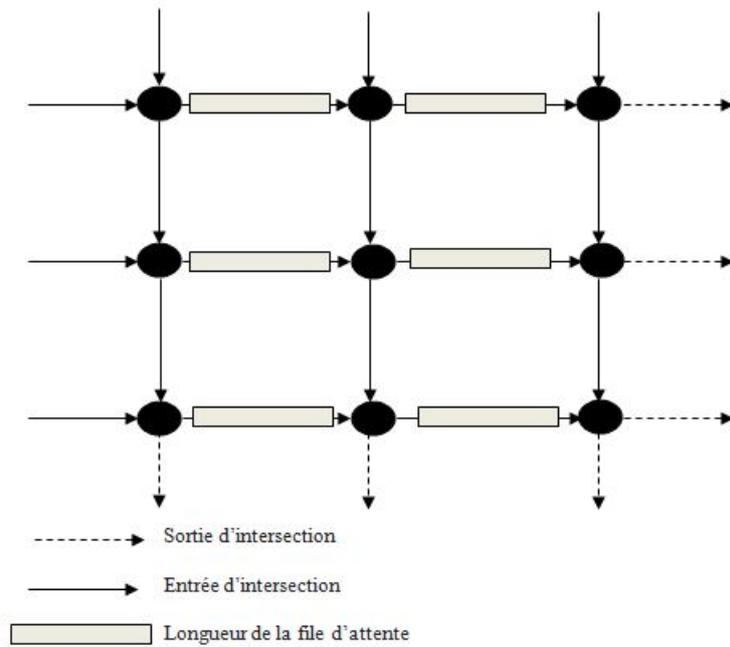


FIGURE 1.8 – Diagramme schématisé d'un réseau de trafic

**i. Intersection isolée simple**

Une intersection isolée simple est un élément le plus simple d'un RTU ; signifie que nous ne considérons pas l'influence des intersections adjacentes. Tout d'abord nous commençons par introduire une terminologie liée aux intersections isolées simples et ensuite discuter le modèle de base du trafic utilisé par la majorité des chercheurs afin de modéliser et commander cette configuration de STU.

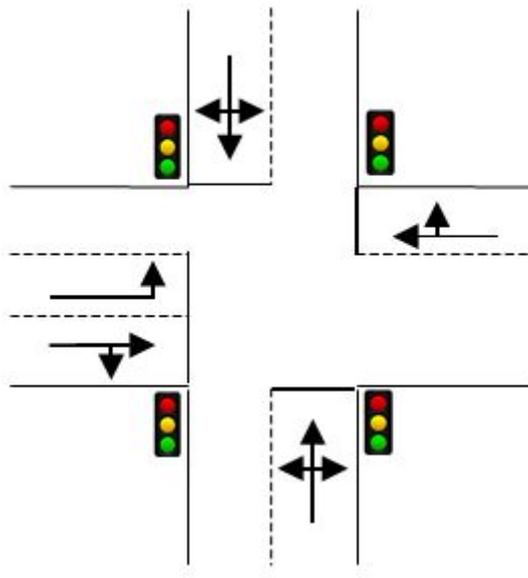


FIGURE 1.9 – Intersection isolée simple

- **Terminologies véhiculaires**

1. **Headway** : est l'intervalle de temps entre les fronts (ou les arrières) de deux véhicules successifs mesurés à un Point fixe sur une route.
2. **Mouvement de trafic** : Lorsqu'un véhicule s'approche d'une intersection commandée par un signal de feux, il sélectionne une voie en fonction de la manœuvre à effectuer. Si la même manœuvre peut être effectuée à partir de plus d'une voie, ces véhicules formeront en fait une file d'attente unique. Le segment de trafic utilisant un ensemble de voies partagées de cette façon est appelé flux ou mouvement
3. **Débit d'arrivée** : Ceci est le taux moyen auquel les véhicules arrivent sur un flux particulier.

- **Terminologie des feux signalisation**

1. **Groupe de signaux** : Ensemble de flux de trafic contrôlés en une seule unité par le contrôleur
2. **Étape ou Phase** : Période au cours de laquelle des indications de signaux restent constants pour tous les groupes de signaux.
3. **Temps de vert** : La durée de temps où les mouvements sont donnés le droit de passage aux véhicules ou appelé le feu vert qui autorisent le passage des véhicules.
4. **Temps de jaune** : Le temps de jaune vient après le vert pour prévenir du passage au rouge.
5. **Temps de rouge** : C'est le temps où tous les véhicules doivent marquer l'arrêt absolu devant un feu rouge.
6. **Cycle de feu** : On entend par cycle, le temps alloué pour passer du début du feu vert au feu jaune, puis au feu rouge et ensuite revenir au début du feu vert. Les temps accordés au feu vert et au feu rouge peuvent varier selon la demande de trafic de chaque intersection. Par contre, le temps accordé au feu jaune est une donnée fixe, qui est habituellement entre 23 et 5 secondes.
7. **Séquence de phases** : Ordre des étapes d'un cycle, à partir d'une étape arbitraire.

- **Modèle de trafic**

Le modèle de trafic décrivant le comportement des véhicules à une intersection à feu est capté par les hypothèses du processus d'arrivée et de départ. Ces processus déterminent l'évolution de la file d'attente pour chaque mouvement de trafic [Cohen, S., 1990].

1. **Processus d'arrivée** : Adams [Adams, 1936] a été le premier à démontrer que le nombre de véhicules en intersection à feu de signalisation passant un point à intervalles est égal suivi une distribution de Poisson. La traçabilité analytique de ce modèle a conduit à une large adoption de l'hypothèse selon laquelle les arrivées de véhicules sur une approche particulière à une intersection isolée se produisent selon un modèle de poisson avec intensité égale au débit d'arrivée.
2. **Processus de départ** : Des études ont démontré qu'après que le signal est devenu vert, Permettant à une file d'attente de véhicules de démarrer à partir du repos, le débit à travers la ligne d'arrêt augmente rapidement à un taux maximum. Le taux de départ reste assez constant à ce taux maximal jusqu'à ce que la file soit entièrement déchargée ou que la période verte se termine. Ce débit de départ maximal est appelé le débit de saturation. Les véhicules arrivant à un signal vert lorsque aucune file d'attente n'est présente ne sont pas retardés.

- **Terminologies supplémentaires**

1. **Degré de saturation** ( $\epsilon$ ) : Le degré de saturation pour un mouvement particulier est défini comme suit;

$$\epsilon = \frac{qC}{gs} \quad (1.19)$$

Le numérateur est le nombre moyen de véhicules arrivant par cycle. Le dénominateur est le nombre maximal de véhicules qui peuvent traverser l'intersection par cycle.

2. **Capacité** : le taux d'arrivée qui produit  $\epsilon = 1$  i.e  $\epsilon = \frac{gs}{C}$
3. **Conditions sous-saturation** : Correspond aux conditions de circulation où le taux d'arrivée pour tous les mouvements est inférieur à la capacité [Gettman, D. et al., 2014].
4. **Conditions sur-saturation** : Si le taux d'arrivée est supérieur à la capacité , l'intersection est dite sursaturée [Gettman, D. et al., 2014].

- ii. **Réseaux artériel**

Un réseau artériel est un réseau routier constitué d'une rue principale qui coupe plusieurs rues latérales. Généralement, la majorité du trafic circule le long de la rue principale.

Pour les intersections situées le long d'une artère principale, les fonctionnements isolés peuvent être améliorés en considérant la coordination des principaux mouvements le long de l'artère. Une longueur de cycle commun est souvent utilisée pour faciliter cette coordination. La coordination est un outil permettant de synchroniser plusieurs intersections afin

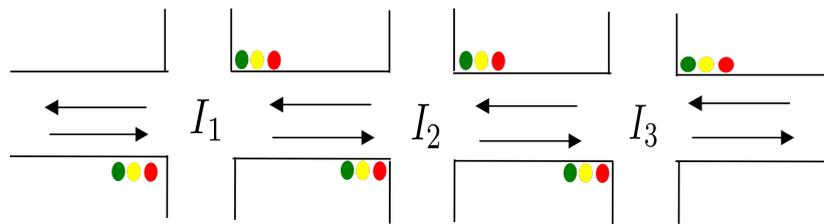


FIGURE 1.10 – Réseau d'artère

d'améliorer le fonctionnement d'un ou de plusieurs mouvements directionnels dans un système.

Pour la plupart des rues artérielles avec l'espacement des signaux entre 150 m et 800 m, l'opération de coordination des feux de trafic peut souvent produire des avantages en améliorant la progression entre les signaux. Sur les artères à vitesses plus élevées, il peut être bénéfique de coordonner les signaux de trafic ou l'espace d'un kilomètre ou plus.

- **Terminologies d'un réseau artériel**

1. **Coordination** : La capacité de synchroniser plusieurs intersections pour améliorer le fonctionnement d'un ou plusieurs mouvements directionnels dans un système.
2. **Décalage relatif** : Avec que les variables de décision, la longueur de cycle, le temps de vert et les phases, le décalage relatif doit être spécifié pour chaque feux du trafic dans le réseau artériel. le décalage relatif est défini par le temps de décalage entre le débit de vert d'intersection et le débit de vert de l'intersection adjacente.
3. **En amont et en aval** : Pour un mouvement de trafic particulier, la direction d'où provient le trafic est appelée direction amont. La direction de déplacement du flux est appelée direction aval.
4. **Diagramme temps-espace** : Un graphique qui trace l'emplacement des intersections signalées le long de l'axe vertical et la synchronisation du signal le long de l'axe horizontal. Il s'agit d'un outil visuel qui illustre les relations de coordination entre les intersections voire figure suivante :
5. **Peloton** : un peloton de véhicules est un groupe de véhicules qui traverse une intersection en même temps.

### 1.4.2 Phénomènes de saturation

Pendant les "heures de pointe", les débits peuvent dépasser la capacité des tronçons, cette situation connue sous le nom de sursaturation. Les conditions de sursaturation sont caractérisées par les phénomènes de trafics suivants [Gettman, D. et al., 2014] :

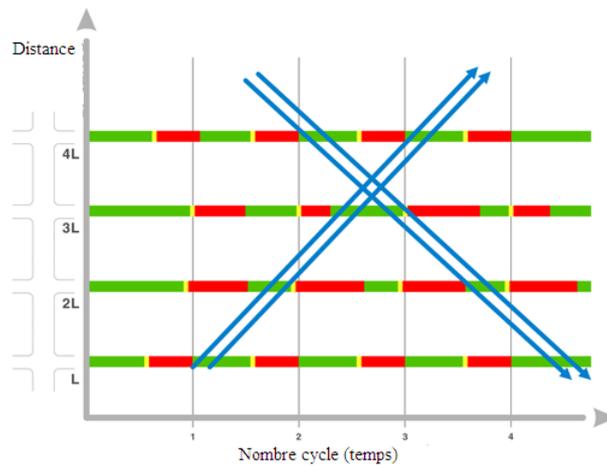


FIGURE 1.11 – Diagramme distance-temps

- **Spillback**, est un phénomène se produit quand une file d'attente à partir d'une intersection en aval utilise tout l'espace sur la voie et empêche les véhicules d'entrer dans l'intersection en amont durant la période de vert. Ce phénomène est appelé aussi (de facto red) se signifie qu'aucune progression dans la voie est possible. Ceci est illustré sur la figure 1.12.

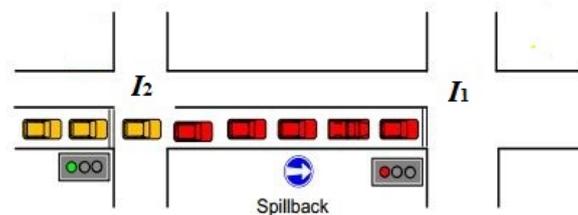


FIGURE 1.12 – Phénomène de Spillback (de facto red)

- **Starvation**, se produit lorsqu'une phase est verte, mais la phase ne peut pas servir à pleine capacité en raison du blocage de stockage, le blocage de spillback, ou peut-être parce que le signal amont est rouge. Starvation en raison de la fréquence du signal mal défini; ce phénomène est illustré à la figure 1.13

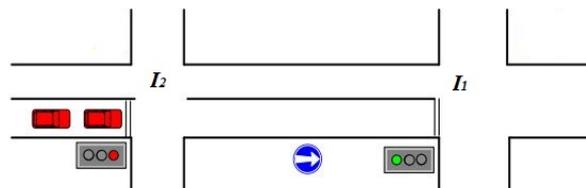


FIGURE 1.13 – Phénomène de Starvation

- **File d'attente résiduelle**, se produit lorsque les véhicules ne peuvent pas traverser l'intersection après la fin de la durée de vert en raison de non-optimalité de la détermina-

tion de temps de feux de trafic; ce phénomène est illustré à la figure 1.14.

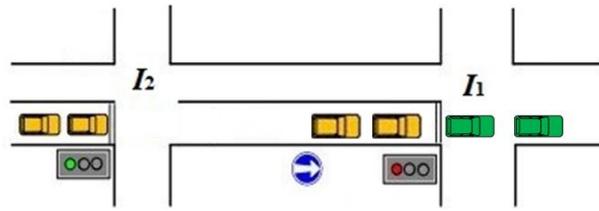


FIGURE 1.14 – File d’attente résiduelle

- **Blocage d’intersection**, lorsque les liaisons sont complètement bloquées, les véhicules peuvent encore se décharger du signal en amont et se mettre en file d’attente dans la zone d’intersection. Si la file d’attente ne bouge pas avant la fin de la vert, ces véhicules bloqueront les mouvements entre les rues. Ce phénomène est connu sous le nom de blocage d’intersection ou grid-lock; autrement dit le grille-lock est un type d’embouteillage où des files d’attente continues de véhicules bloquent tout un réseau de rues qui se croisent, ce qui amène le trafic dans toutes les directions à un arrêt complet.
- **Degré de saturation**, en général l’état de la circulation peut être défini par **le degré de saturation**  $\varepsilon_i$  défini comme suit [Gettman, D. et al., 2014] :
  - $\varepsilon_i \leq 0.85$  L’intersection fonctionne sous capacité. État fluide de circulation; il n’y pas de congestion;
  - $0.85 \leq \varepsilon_i \leq 0.95$  L’intersection fonctionne proche de sa capacité.
  - $0.95 \leq \varepsilon_i \leq 1$  État du trafic instable; la file d’attente se produit progressivement;
  - $\varepsilon_i \geq 1$  la demande excède la capacité disponible de l’intersection, les phénomènes de sursaturation se produisent : Spillback et file d’attente résiduelle sont prévus;

## 1.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons exposé les vocabulaires usuels et les différentes terminologies liées au domaine du trafic urbain. Une description détaillée du système de gestion du trafic urbain et des capteurs les plus usuels a été présenté. Ensuite une classification des différents modèles du trafic et ses caractéristiques ont été abordées. Enfin un ensemble des terminologies liées à la commande des feux de trafic et les phénomènes de trafic a été présenté.

# Chapitre 2

## Sur la commande de système de trafic urbain

*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique : Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi! »*

---

Albert Einstein

## 2.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'importance de la modélisation pour l'étude de la circulation du trafic urbain. L'étape de modélisation représente une étape incontournable pour la conception des lois de commande de système de trafic urbain.

En effet, face au problème de congestion des véhicules dans les réseaux urbains qui fait l'un des challenges des pays développés et dans le monde entier. Il s'agit donc d'optimiser et de gérer l'utilisation des réseaux urbain et l'infrastructure existantes de façon optimale afin d'éviter l'embouteillage et la congestion récurrents dues à l'afflux des véhicules aux heures de point durant les différentes périodes dans la journée, et aux congestions non récurrents causées par les incidents non prévues comment : les accidents, les obstacles. Dans cette optique, la commande du trafic urbain, apparaît comme une solution viable pour résoudre ces problèmes. L'objectif est de mettre en œuvre un ensemble d'actions et de mesures permettant la gestion et la fluidité du trafic urbain. La commande du flux de trafic doit répondre à un certain nombre de critères de performance des réseaux tels que la minimisation du temps d'attente, maximisation du débit de sortie des véhicules, la minimisation de degré de saturation . . . etc.

Les premiers travaux dédiés aux problèmes du trafic sont apparus dès les années soixante et restent à ce jour un sujet d'actualité grâce au développement des technologies d'information. Dans le domaine de commande du trafic, on distingue deux grandes catégories : La première concerne la régulation du flux de trafic dans les zones urbaines et au centre des agglomérations. Elle consiste à mettre en œuvre des actions et des algorithmes de commande pour optimiser les paramètres des feux de signalisation tels que : longueur de cycle des feux, durées de feu vert, temps de décalage, et d'analyser leurs impacts sur la qualité de la circulation : c'est l'objet de cette étude. La deuxième concerne la régulation du flux autoroutiers tels que : Contrôle d'accès, régulation dynamique des vitesses,...etc.

Dans ce chapitre, nous présentons un aperçu sur les méthodes de commande des feux de signalisation dans les zones urbaines.

## 2.2 La régulation via les feux de signalisation

La régulation du flux à travers les feux tricolore est la stratégie la plus traitée dans la littérature et la plus utilisée sur le terrain. Les premiers feux de signalisation ont été installés sur les intersections pour pallier aux importants problèmes de sécurité engendrés par le croisement d'axes routiers. Cependant, les méthodes de réglage des feux ont privilégié la sécurité

au détriment des temps d'arrêt des usagers. De cette constatation, il apparait que le réglage des feux doit se faire en tenant compte les flux de trafic, et doit répondre à des objectifs divers :

- Minimisation des temps d'attente des véhicules ou des piétons à l'intersection.
- Réduction des accidents en résolvant les conflits entre les flux de véhicules et les piétons.
- Optimisation des flux de véhicules sur un réseau large.
- Optimisation de la consommation de l'énergie pour les véhicules

Un plan de feu d'une intersection est déterminé par la spécification de quatre variables : (Figure 2.1), [KACHROUDI, S., 2010] :

- **Diagramme de phase** : une phase est une période de temps pendant laquelle des mouvements compatibles ont accès à l'intérieur d'une intersection. Un diagramme de phase est une succession de phases qui permet l'accès à tous les mouvements.
- **Temps de dégagement appelé également rouge intégral** : temps insérés entre deux phases pour des raisons de sécurité.
- **Longueur du cycle** : la durée totale de toutes les phases et des temps de dégagement.
- **Décalage** : la durée qui sépare deux événements de référence de deux intersections successifs. Il permet d'établir une "onde verte" pour les véhicules traversant successivement deux intersections.

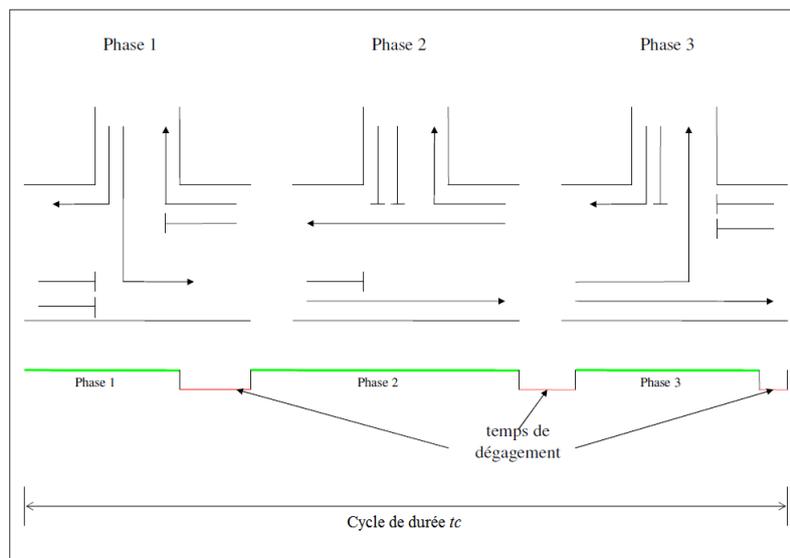


FIGURE 2.1 – Plan de feu d'une intersection simple

[Papageorgiou, M. et al., 2003] a classé les stratégies de commande de feu de signalisation selon plusieurs critères; celles qui s'appuient sur les plans de feux fixes déterminés à partir

de données statiques recueillies sur les sites réels, et celles qui s'appuient sur les plans de feux adaptatifs ou en temps réels.

- **Les plans de feux fixes**

Les plans de feux fixes ou les stratégies à cycles fixes sont les plus utilisés dans le monde, puisque ils sont les plus simples, moins coûteux et plus facile à entretenir. Les signaux assignent le droit de passage aux intersections selon des temps prédéterminés exemple : plans de synchronisation, la séquence de phase, la durée du cycle et le décalage pour chaque feux sont fixés , et déterminés sur la base des données historique de trafic. Parce qu'ils ne tiennent pas en compte des variations du flux de trafic[Allsop R.E.,1972 ].

Il est à noter que les plans de feux fixes ne sont pas fixés pour toutes les périodes d'une journée ou pour tous les jours. Un choix doit être effectué entre les différents plans disponibles au poste de commande selon la situation du trafic. Un opérateur trafic peut réaliser ce choix manuellement; c'est généralement le cas lorsqu'il détecte un événement exceptionnel nécessitant une gestion adaptée du réseau (ou d'une sous partie du réseau).

Toutes les méthodes sont généralement utilisées en conjonction avec des microcontrôleurs qui permettent de prendre en compte, au niveau d'une intersection isolée, les perturbations locales des conditions de trafic. Par exemple : réallocation des verts (transfert du temps de vert non utilisé d'une phase à une autre), escamotage de phase (une phase est sautée), priorité à un véhicule de transport public détecté, etc.

- **Les contrôleurs temps-réel**

Dans les techniques temps réel ou dit les stratégies adaptatives utilisent les mesures en temps réel pour trouver les meilleures valeurs optimales des feux de signalisation, le système doit être capable de s'adapter immédiatement (ou très brièvement) aux conditions de trafic, et d'optimiser le contrôle des feux. Cette classe de simulateurs calcule les variables de commande des feux de signalisation (le partage du vert, le décalage et la longueur du cycle de feu) en fonction des fluctuations du trafic. Ces systèmes sont coûteux, au-delà du budget de la majeure partie de nos communes d'Algérie. Citons quelques exemples de contrôleurs :

1. Le système français GERTRUDE est une combinaison de plans pré-calculés et d'adaptatif temps réel utilisant un micro-contrôle centralisé et des stratégies particulières convenant à chaque site. GERTRUDE est déployée dans plusieurs villes et dans plusieurs pays : Bordeaux, Lisbonne, Asunción, Casablanca, Porto, etc. [Boujard, 1996].

2. Le système anglais SCOOT est un des systèmes temps réel les plus connus. Cependant, l'optimisation n'est pas globale, mais appliquée séparément au temps de cycle, à la répartition des verts et au décalage [Hunt et al. 1981].
3. Le système italien UTOPIA [Di Taranto & Mauro, 1989] est un système hiérarchique décentralisé. Ces principales caractéristiques sont la priorité absolue donnée à certains véhicules publics et l'optimisation du trafic des véhicules des particuliers en toute situation.
4. Un des systèmes temps réel les plus représentatifs (c'est -à-dire avec une adaptation immédiate aux conditions de trafic et avec une minimisation explicite d'un critère pour prendre une décision) est PRODYN, développé à l'ONERA-CERT [Henry J-J,& Farges J-L., 1989.]

Dans la suite, nous établissons une distinction selon que la stratégie de commande des feux utilise la notion de cycle ou pas. Nous parlons alors de stratégies cycliques si la notion de cycle existe et de stratégies acycliques dans le cas contraire.

- **Stratégies cycliques (tenant compte du cycle)**

La première famille considère les cycles comme fixes pendant une période donnée. Ceci n'empêche pas que les durées des cycles peuvent changer d'une période à une autre.

- **Stratégies acycliques (ne tenant pas compte du cycle)**

Cette famille de stratégies de régulation ne considère pas explicitement la notion de cycles, de décalages ou de durées des phases de vert. Les successions de phases de vert et de rouge sont aperçues comme des instants de commutation. Sur un horizon de planification déterminé à l'avance, ces stratégies déterminent si, au pas de temps actuel, une commutation est nécessaire. Le choix des commutations s'effectue suivant un critère de performance donné.

Les stratégies de commande avancées ont été mises en œuvre soit dans un simulateur de trafic ou dans la pratique avec divers degrés de succès rapportés sous différentes conditions d'exploitation. Une stratégie de commande optimale des feux de trafic devrait être en mesure de faire face à toutes les conditions de circulation, à savoir la sous-saturée (trafic léger avec un petit nombre de files d'attente), saturé (trafic lourd avec file d'attente raisonnable) et sursaturée (trafic très lourd avec la congestion conduisant à la file d'attente spillback et file d'attente résiduelle).

Les stratégies de commande des feux de signalisation peuvent être largement classées en en boucle ouverte ou en boucle fermée et avec modèle ou sans modèle. Dans la suite, nous

montrons certaines stratégies de commande des feux de circulation urbaine existantes dans la littérature sur la base de ces classifications.

## 2.3 Méthodes de commande en boucle ouverte

Les méthodes de commande des feux de signalisation en boucle ouverte sont utilisées pour calculer des plans de feux fixes qui définissent un fonctionnement cyclique immuable des feux des intersections. Il s'agit tout d'abord de définir le phasage c'est à dire choisir l'ensemble des phases qui seront utilisées pour la commande de l'intersection. Le phasage peut être un sous ensemble de l'ensemble de toutes les phases possibles car il n'est pas toujours nécessaire de conserver toutes les phases possibles pour assurer la commande de l'ensemble des feux. Une fois le phasage choisi, le calcul du plan de feux consiste en, la détermination des trois paramètres suivants : la durée de cycle, la durée de temps vert, durées de phase et le décalage.

On distingue deux types des méthodes de calcul de ces paramètres : les méthodes analytiques et les méthodes algorithmiques.

### 2.3.1 Les méthodes analytiques

Les méthodes analytiques correspondent à des techniques qui, même si elles ne fournissent pas toujours la solution sous la forme d'une formule explicite, permettent au moins un calcul manuel de celle-ci. Elles sont utilisées dans les cas d'intersections simples et d'artères. Les trois principales méthodes de calcul des cycles et durées de vert sont celles de Wardrop, Greenshield et Webster (la plus fréquemment utilisées). Pour le calcul des décalages, les techniques d'ondes vertes sont utilisées. Les variables sont :

- $t_c$  la durée du cycle
- $A_i$  le débit moyen d'arrivée de la voie commandée par le feu  $i$ .
- $S$  le débit de saturation (débit maximum) de la voie commandée par le feu  $i$
- $\nu_i$  la durée du vert effectif pour la voie  $i$ .
- $d_\vartheta$  la durée durant laquelle la phase  $\vartheta$  sera appliquée
- $T_p$  la somme des temps perdus entre phases (temps orange+ rouges barrages)

On a donc

$$tc = T_p + \sum_{\text{phase}\phi} t\phi \quad (2.1)$$

### a. Méthode de Wardrop

Cette méthode permet de calculer le cycle de durées de phases minimales permettant d'écouler le trafic sur tous les tronçons dans le cas d'arrivées uniformes. Elle est valable uniquement dans le cas où chaque feu apparaît dans une seule phase. Pour écouler le trafic sur l'ensemble des tronçons, il faut que pour chaque tronçon le nombre de véhicules arrivés pendant un cycle puisse s'écouler pendant le vert soit :

$$tg_i.S_i \geq A_i.tc \Leftrightarrow tg_i \geq \frac{A_i}{S_i}.tc \quad (2.2)$$

La durée minimale  $t\phi$  d'une phase est donc imposée par :

$$t\phi = tc.\max(y_i) \quad (2.3)$$

Ou  $y_i = A_i/S_i$  est la charge du feu.

En notant  $Y_\phi = \max(y_i)$  la charge de la phase, on définit la charge d'une intersection par :

$$Y = \sum_{\text{phases}\phi} Y_\phi \quad (2.4)$$

Ce qui nous permet d'écrire, d'après l'équation 2.1, l'expression analytique de la durée du cycle :

$$tc = \frac{T_p}{1-Y} \quad (2.5)$$

### b. Méthode de Greenshield

La méthode de Greenshields fait intervenir la probabilité  $P_i$  de retenir un usager pendant plus d'un cycle sur le feu. Cette probabilité est appelée probabilité de défaillance [Greenshields, D. et al, 1947]. En supposant des débits d'arrivées poissonniers, elle s'exprime par : (en notant  $Ent(x)$  partie entière de  $x$ ) :

$$P_i = e^{-A_i.tc} \sum_{n=Ent(S_i.tg_i)}^{\infty} \frac{(A_i.tc)^n}{n!} \quad (2.6)$$

On procède alors par approximations successives :

- On choisit une durée de cycle  $tc$  arbitraire, et on répartit les vert proportionnellement à la charge  $Y\phi$ , de chaque phase.
- On calcule alors la probabilité de défaillance de chaque feu
- Si les probabilités de défaillance sont toutes inférieures à un seuil arbitraire (5% par exemple), les valeurs sont alors considérées comme bonnes, sinon on augmente les verts des voies à plus forte probabilité de défaillance

### c. Méthode de Webster

Dans [Webster, 1958], les auteurs ont proposé une formule importante pour trouver la durée de cycle optimale  $tc$  en minimisant le retard subi par les véhicules :

$$tc = \frac{1,5T + 5}{1 - Y} \quad (2.7)$$

Où  $T$  désigne le temps total perdu par cycle et  $Y$  la charge de l'intersection.

$$T = \sum_1^n T_p + \sum_1^n tr_i \quad (2.8)$$

Où  $n$  est le nombre de phases dans l'intersection,  $T_p$  est le temps perdu,  $tr_i$  désigne le rouge intégral. En règle générale, la valeur moyenne  $T_p$  et  $tr_i$  correspond respectivement à 5,5 s et 2 s [Cohen, 1990]. Il en résulte :

$$T = 7,5 n \quad (2.9)$$

$$Y = \sum \frac{A_p}{S_p} \quad (2.10)$$

Les valeurs de  $S_p$  adoptées comme référence [Cohen, 1990] sont :

$S_p = 1820$  uvp/h/tronçon dans une agglomération importante.  $S_p = 1650$  uvp/h/tronçon dans une petite ville.

$$tc = \text{rouge} + \underbrace{\text{vert réel} + \text{jaune}}_{\text{vert effectif}} \quad (2.11)$$

La durée du vert utile  $tg_i$ , est égale à la différence entre la durée du cycle et le temps total perdu, pondérée par la charge de sa phase.

$$tg = \frac{A_p/S_p}{Y} (tc - T) \quad (2.12)$$

Ainsi, le temps du vert réel s'obtient en ajoutant au vert utile le temps perdu par phase  $T_p$  et en retranchant le temps du jaune (souvent de 3 s).

— **Exemple d'application**

Considérons l'intersection simple présentée dans la figure 2.2 fonctionnant en deux phases. Les débits de saturations à l'entrée de chaque tronçon sont supposés égaux aux valeurs suivantes :

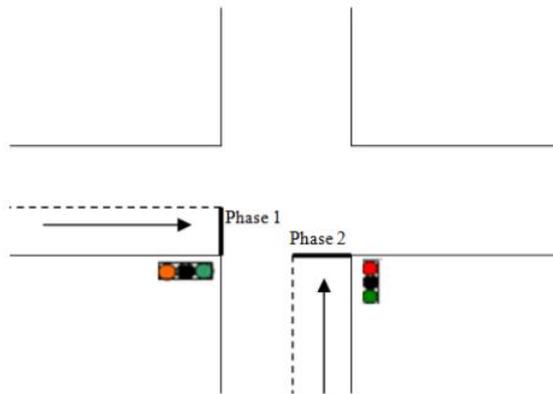


FIGURE 2.2 – Intersection simple

$S_1 = 3210$  uvp/h,  $S_2 = 1820$  uvp/h, Avec les taux d'arrivés respectifs :  $A_1 = 770$  uvp/h,  $A_2 = 411$  uvp/h

De l'équation 2.7, on obtient :  $Y = \frac{770}{3210} + \frac{411}{1820} = 0,46$ .

Le temps total T perdu pendant le cycle vaut :

$$T = 7,5 \times 2 = 15s$$

La durée de cycle optimale s'en déduit :

$$tc = \frac{(1,5 \times 15) + 5}{1 - 0,46} \cong 51 s$$

D'où la répartition des verts utiles dans la durée du cycle est :

$$tg_1(\text{phase 1}) = 18 s \text{ et } tg_2(\text{phase 2}) = 17 s;$$

d. **Onde verte**

Pour la commande de plusieurs intersections, il est conseillé de prendre comme cycle commun celui de l'intersection la plus chargée et de calculer les décalages entre le début de vert en utilisant la technique de l'onde verte. Cette technique, permettant de synchroniser les intersections d'une artère, utilise un graphique temps distance sur lequel est reportée la droite correspondant à la vitesse de progression désirée. Dans le cas d'une artère à sens unique, les débuts des phases servant l'artère à chaque intersection sont calés sur cette droite [FHW, 1975].

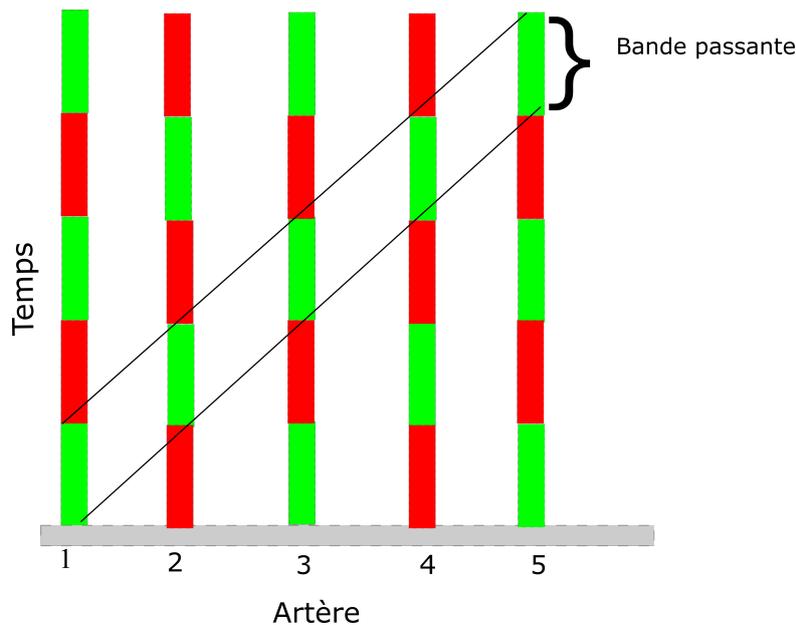


FIGURE 2.3 – Diagramme temps distance d'une artère avec une coordination unidirectionnelle

La figure 2.3 montre un diagramme temps distance de 5 intersections avec une coordination unidirectionnelle. Les longueurs de cycle sont toutes identiques, la bande passante indique la durée disponible pour que les véhicules traversent l'artère avec certaine vitesse et sans s'arrêter [Banks James H, 2002]. L'efficacité de la bande passante est définie par l'équation suivante :

$$e = \frac{bw}{tc} \cdot 100\% \quad (2.13)$$

- $e$  = Efficacité de la bande passante (%);
- $bw$  = Bande passante (sec)
- $tc$  = Longueur de cycle (sec)

Les décalages idéals peuvent être déterminés par l'équation suivante [Roess, et al. 1998] :

$$to = \frac{D}{V} \quad (2.14)$$

- $t_0$  = Les décalages idéals (sec)
- $D$  = Distance entre les intersections (m)
- $V$  = Vitesse idéale du véhicule (m/s)

Dans le cas d'une artère à double sens, on centre, sur l'origine des temps, soit le vert soit le rouge d'une phase servant l'artère, de manière à maximiser la durée pendant laquelle les feux sont coordonnés dans les deux sens pour la vitesse considérée.

### 2.3.2 Les méthodes algorithmiques

Ces méthodes ont été développées pour calculer des plans de feux sur des intersections complexes ou sur des réseaux d'une intersection. Elles utilisent des modèles d'écoulement du trafic permettant d'évaluer les performances d'un plan de feux en terme d'un critère (temps perdu, nombre d'arrêts, émission de polluant, consommation de carburant). Deux classifications sont prises en considération pour le contrôle en temps fixe et ces classifications sont proposées sur la base de la méthode appliquée pour calculer le temps vert :

La méthode basée sur la progression vise à maximiser la bande passante de la progression des véhicules, on peut citer : PASSER [Messer, C. et al. 1974], MAXBAND [Chang, E. C. P. et al 1988], et MULTIBAND [Gartner, N.H., et al. 1996].

La méthode fondée sur la désutilité, une approche basée sur la minimisation des indices de performances telles que le nombre d'arrêts des véhicules et le temps global de retard de Voyage. On peut trouver TRANSYT-7f [Robertson, DI. 1969] et SYNCHRO [Sun, C. Xu, J. 2009.].

Les plans de feux calculés par les méthodes en boucle ouverte sont établis pour une période pendant laquelle les débits sont considérés comme constants. Lorsqu'au cours d'une journée, la variation des débits est importante, il faut découper cette journée de manière à en dégager les différentes périodes où les débits peuvent être considérés comme constants. On calcule ensuite un plan de feux pour chacune de ces périodes de manière à obtenir une bibliothèque de plan de feux. Le plan appliqué sur l'intersection sera alors celui correspondant à la période courante de la journée.

## 2.4 Méthodes de commande en boucle fermée

Le principal inconvénient des différentes méthodes hors ligne est qu'elles ne sont pas capables de s'adapter aux variations instantanées de trafic et nécessitent une remise à jour régulière des plans pour tenir compte de l'évolution des débits moyens. Pour pallier à ces

inconvénients, on a vu ensuite apparaître des stratégies de commande en ligne capables d'adapter, en temps réel, leur commande à la situation de trafic courante mesurée à l'aide de capteurs magnétiques enterrées sous la chaussée. On peut distinguer deux principales familles de commandes temps réel : Celles destinées à la commande d'une intersection isolée et celles destinées à la commande d'un réseau d'intersections.

### 2.4.1 Commande d'une intersection isolée

Dans les littérateurs, plusieurs algorithmes destinés à la commande des feux de signalisation en temps réel d'une intersection isolée (l'intervalle-véhicule, le volume - densité et l'algorithme de Miller, MOVA, LHOVRA) sont présentés ici.

#### a. Commande intervalle-véhicule

Cette méthode est la plus utilisée. Son objectif est la minimisation des retards ainsi que des longueurs de queues selon la présence ou non de véhicules à l'intersection. Elle dépend largement des paramètres de commande suivants : le temps de prolongation du vert, la durée minimum et maximum du feu vert [Rouphail et al., 1992]. Le temps de prolongation est l'unité d'extension du vert pour chaque arrivée de véhicule. La durée minimum du feu vert est la somme de l'intervalle initial et de l'unité d'extension. L'intervalle initial est défini lorsqu'aucun véhicule n'est présent dans la zone délimitée par la position du détecteur et la ligne d'arrêt. La durée maximum du feu vert est la borne supérieure au-delà de laquelle le feu commute vers le rouge.

Son algorithme se résume comme suit [Papageorgiou et al., 2003] : au début de la phase, on donne au temps de vert une durée minimale. Si aucun véhicule n'a été détecté pendant ce temps, le vert est alors coupé et la phase suivante commence. Le même processus est ensuite appliqué à cette phase, au contraire, le détecteur est informé du passage d'un véhicule, la durée du vert est prolongée d'un temps  $\Delta t$  après la détection de ce véhicule. Cette prolongation est fixe.

Elle doit permettre au véhicule de franchir la distance entre la boucle et la ligne d'arrêt. Une nouvelle prolongation du vert est accordée dès qu'un nouveau véhicule se présente pendant un intervalle de temps  $I$  appelé intervalle véhiculaire. Cet intervalle est l'écart maximum entre deux véhicules au-delà duquel aucune prolongation n'est accordée au suivant. Pendant chaque intervalle véhiculaire on observe si un nouveau véhicule est détecté afin d'accorder une nouvelle prolongation de la durée du vert. Dans le cas où aucun véhicule n'est détecté le feu passe à la phase suivante. Afin d'éviter une conservation du vert sur une

durée trop longue, sa prolongation est contrainte par le vert maximum qui ne pourra être dépassée quelle que soit la demande pour la phase considérée. En général, les paramètres de cette commande sont calculés en exploitant des mesures. Lors de ce calcul, il est nécessaire de tenir compte des interactions entre la position des capteurs, la durée de prolongation du feu et l'intervalle initial.

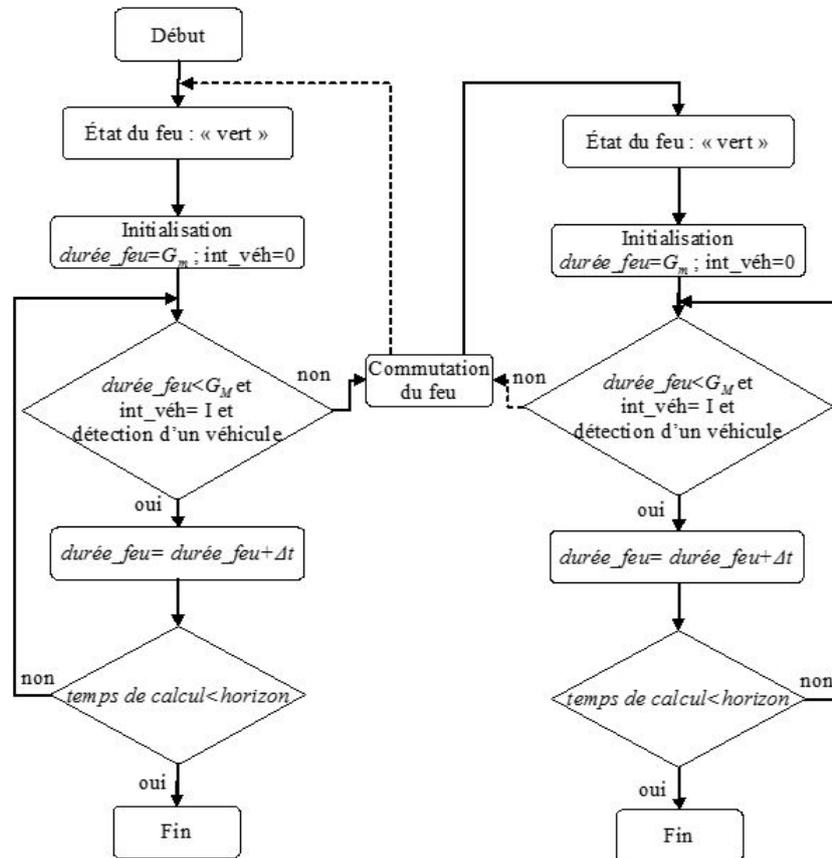


FIGURE 2.4 – Organigramme de l'algorithme de commande intervalle-véhicule [Tolba, 2004].

### b. Algorithme de commande débit-densité

C'est une variante de l'intervalle-véhicule où la durée de vert minimale accordée à un feu est fonction du nombre de véhicules en attente à ce feu et où la longueur de l'intervalle critique est calculée en fonction du nombre de véhicules en attente sur les autres feux.

Comme dans cette solution le capteur, en plus de servir à la détection des véhicules, sert aussi à évaluer le nombre de véhicules en attente, il doit être situé plus en amont de la ligne de feu (à environ 80 m).

L'algorithme débit-densité est recommandé pour des intersections isolées caractérisées par une forte demande (i.e. les taux d'arrivés des véhicules sont élevés) et une vitesse limitée à 60 km/h ou plus. Cependant, la grande distance qui sépare la ligne d'arrêt et la position des détecteurs (80 m environ) peut créer de l'incertitude. En effet, sur cette distance des

véhicules détectés peuvent quitter la route ou stationner, auquel cas une phase inutile sera donnée. D'autres véhicules peuvent accéder à la route sans être détectés et par conséquent aucun droit de passage ne peut être donné tant qu'il n'y a pas de détection d'un nouveau véhicule.

### c. Algorithme de commande de Miller

C'est un algorithme dynamique auto-adaptatif proposé par Miller [Miller,1965]. Le principe consiste à minimiser les temps d'attente globaux sur l'ensemble des intersections. A chaque pas allant de 1 à 2 s, l'algorithme teste la meilleure hypothèse entre la commutation immédiate du vert et la commutation du vert différée d'un ou de plusieurs pas. Des approches similaires ont été également proposées par [Van Zijverden. & Kwakernaak, 1969].

[Bang & Nilsson, 1976] ont implémenté l'algorithme de Miller sur une intersection isolée et ont révélé certains gains par rapport à la commande à cycle prédéterminé et à l'algorithme intervalle-véhicule. Cependant, ils ont constaté que cet algorithme n'est pertinent que sur un horizon très court. Cette méthode nécessite l'utilisation d'un capteur par tronçon situé à 80m de la ligne de feu. Par ailleurs la durée du prochain rouge est estimée par celle du dernier rouge écoulé.

### d. Méthode de commande MOVA

Les recherches menées depuis 1980 par le laboratoire anglais TRRL (Transport and Road Research Laboratory) ont abouti au développement de la méthode MOVA (Modernised Optimised Vehicle Actuation) [Vincent, RA & Young, C.P. 1986]. Cette méthode, destinée à optimiser les durées d'arrêt sur une intersection isolée, repose sur la méthode de l'intervalle - véhicule améliorée par un processus d'optimisation inspiré de l'algorithme de Miller. Le principe de fonctionnement de MOVA peut se résumer par les trois points suivants :

- On donne suffisamment de vert pour vider la queue jusqu'à 40 m.
- On observe les intervalles véhicules pour savoir si le débit passe en dessous du débit de saturation.
- On étudie l'intérêt, du point de vue du temps perdu global, d'une coupure du vert pour servir une phase antagoniste.

MOVA dispose aussi de fonctions plus spécifiques notamment pour traiter les situations de congestion : Quand le système détecte qu'en fin de vert il n'a pas pu résorber la queue, il bascule dans un mode spécial de maximisation de capacité, pour résoudre le problème de congestion sur l'(les) approche(s) concernée(s). Pour assurer la commande deux capteurs par voie sont nécessaires :

- Un capteur à 40 m (à 3,5 secondes de la ligne de feu) : Cf. intervalle véhicule.
- Un capteur à 100 m (à 8 secondes de la ligne de feu) : Cf. Miller.

L'optimisation par l'algorithme de Miller évite les coupures de vert inutiles propres à l'intervalle véhicule, ainsi que les prolongations de vert non nécessaires dans des conditions fluides. Le réglage délicat d'une durée de vert maximum propre à l'intervalle véhicule est ainsi évité et une réduction du nombre de véhicules passant au rouge a pu être observée.

Cependant, sans détecteur plus proche de la ligne de feu (avant 40m) et sans durée de vert maximum, un véhicule détecté à 40m et n'ayant pas eu le temps de passer la ligne de feu connue prévu, devra attendre qu'un autre véhicule active le capteur. Une étude comparative entre MOVA et une stratégie basée uniquement sur l'intervalle véhicule [Young, C.P. 1988.] a permis d'observer une réduction significative du temps perdu moyen. Bien qu'initialement conçue pour des intersections isolées, MOVA a aussi été implanté sur un réseau des intersections et ses performances ont été comparées avec celles de TRANSYT [Robertson, D.I. 1997], Il a été constaté que TRANSYT, grâce à la coordination des feux, donne de meilleurs résultats en trafic fluide ou si les feux sont très rapprochés. Cependant il s'est avéré que MOVA donne de meilleurs résultats pendant les périodes de pointe. Il a été démontré que le passage de l'une à l'autre de ces méthodes, en fonction du trafic permet de réduire le temps perdu ainsi que les émissions polluantes des véhicules.

#### e. Méthode de commande LHOVRA

LHOVRA est un système développé en Suède à partir des années 1980. Cette méthode de commande qui s'applique à des intersections isolées, est conçue pour un environnement rural. Son objectif principal est avant tout la réduction du nombre d'accidents. En plus de la commande LHOVRA fournit une méthodologie de conception des intersections tant au niveau de la géométrie que de la position des feux [Ornfelt L.& Larsson, A. 1991]. LHOVRA est un système dérivé de l'intervalle véhicule qui traite de manière empirique les six fonctions suivantes :

- **L** : Priorité aux poids lourds : En détectant au plus tôt les poids lourds arrivant à l'intersection.
- **H** : Priorité à la route principale : En détectant au plus tôt les véhicules présents sur la route principale.
- **O** : Réduction des incidents : Quand un véhicule risque de se trouver dans une situation critique où il devra choisir entre passer au rouge ou risquer de se faire percuter par l'arrière en stoppant, il se voit attribuer une extension de vert.

- **V** : Vert-Orange à durée variable (en Suède, le vert est associé à l'orange avant le passage au rouge) : Si aucun véhicule n'est détecté en-dessous d'une certaine distance du feu, la durée de l'orange est réduite afin de gagner sur le temps perdu entre phases.
- **R** : Réduction du risque dû aux passages au rouge : Le passage au vert de la voie antagoniste peut être différé si un véhicule risque de griller le rouge (extension du rouge barrage).
- **A** : État de repos au rouge intégral : afin de limiter les séquences vert - orange – rouge - vert sans service des voies antagonistes. (Cf. durée de vert minimum de l'intervalle véhicule dont LHOVRA est une extension).

Le système LHOVRA nécessite la présence de 5 boucles magnétiques par tronçon commandée (capteurs à 10, 85, 140, 200 et 300 mètres de la ligne de feu). En milieu rural la grande proportion de poids lourds et les difficultés de dépassement conduisent à la formation de pelotons (perturbation des flux d'arrivées), grâce à la fonction L ces pelotons peuvent être détectés et rendus prioritaires ce qui limite le nombre d'arrêts. La fonction V permet de réduire les temps perdus liés au changement de phase notamment dans des conditions de faibles densités de trafic. La fonction A réduit aussi ces temps perdus. Les fonctions O et R ainsi que la topologie du carrefour permettent de limiter le nombre d'accidents dus aux feux rouges grillés (25 à 50 % des accidents en milieu rural sont dus à cette infraction, qu'elle soit volontaire ou non), ainsi que les collisions dues aux décélérations brutales. Le système conduit à une réduction des accidents de l'ordre de 25 %. Cependant, le fait de mélanger aménagement de carrefour et commande rend la comparaison avec d'autres systèmes délicate. Il n'existe pas non plus de possibilités de coordination entre carrefours et la réalisation du système repose plus sur des constatations pratiques, que sur une modélisation du trafic.

#### **f. Méthode de commande OPAC**

OPAC -Real Time Optimization Policies for Adaptive Control, a été conçu en 1982 dans le cadre d'une collaboration entre l'Université de Lowell, Massachusetts, et le département américain des Transports [Gartner, N.H., 1990]. Le système a été testé dans la ville d'Arlington, en Virginie, et dans la ville de Tucson, en Arizona.

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

isolé.

### 2.4.2 Commande d'un réseau d'intersections

Du fait de la nécessité de coordination de différentes intersections, la commande en temps réel d'un réseau d'intersections est un problème bien plus complexe que celle d'une intersection isolée. Les premiers systèmes de commande boucle fermée d'un réseau d'intersections sont apparus dans des années 60 et sont directement dérivés des méthodes de commande hors ligne et non des méthodes de commande en ligne des intersections isolées. Ces systèmes sont basés sur l'utilisation d'une bibliothèque de plans de feux fixes calculés hors ligne et appliqués ensuite, non plus sur la base de la période de la journée, mais en fonction des débits et taux d'occupation mesurés par des capteurs répartis sur le réseau.

Cette stratégie basée soit sur la méthode des vecteurs, soit sur celle des seuils, est donc une sélection en temps réel d'un plan dont les conditions moyennes (débits, vitesses ... ) sont les plus proche des conditions estimées et non le calcul, à partir des informations disponibles, du plan de feu optimal à appliquer.

Le problème majeur de ces systèmes est lié au vieillissement des plans. En effet, les bibliothèques doivent être régulièrement remises à jour de manière à contenir des plans correspondants au mieux aux conditions réelles de trafic. Conservant la notion de plan de feu, on a vu ensuite apparaître une seconde génération de systèmes de commande qui cherchent à recalculer, en ligne et à partir des informations collectées sur l'état du réseau, les paramètres des plans de feu de manière à lutter contre leur vieillissement.

Une synthèse des méthodes de commande en temps réel de feux de signalisation en milieu urbain est présentée dans [Braban & Boillot, 2014]. L'auteur propose une classification des méthodes en deux catégories :

- Une première catégorie se compose des systèmes SCATS , SCOOT, UTOPIA, et PRO-DYN ayant acquis une certaine notoriété publique; ils sont implantés de manière opérationnelle dans des villes .
- Une deuxième catégorie regroupe des systèmes plus récents MOTION, CARS, CRO-NOS, qui ont fait au moins l'objet d'études en simulation, voire même d'implantation expérimentale sur site; ils existent depuis plusieurs années et ont fait l'objet de plusieurs publications. Ils sont décrits plus succinctement.

Dans la suite, on présente les systèmes de commande des feux les plus fréquemment utilisées (SCATS , SCOOT, UTOPIA, et PRODYN)

**a. Méthode de commande SCATS**

Ce système développé depuis les années 1970 pour répondre aux besoins de la ville de Sydney (Australie) est aujourd'hui utilisé en Asie du sud-ouest et en Océanie. En 1995, plus de 2500 carrefours de Sydney étaient commandés par SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System). SCATS comporte une architecture hiérarchisée en trois niveaux [Lowrie, P.R. 1982] :

- Les contrôleurs d'intersections ont pour objectif de mettre en forme les signaux issus des boucles de mesures placées en ligne de feu pour les communiquer à l'ordinateur régional dont ils dépendent. D'autre part ils sont aussi chargés de l'application des commandes transmises par ce même ordinateur régional. En cas de problèmes ils basculent sur un mode de fonctionnement dégradé leur permettant soit d'effectuer une micro-régulation locale à partir d'un plan de feux fixe issu d'une bibliothèque soit d'appliquer ce plan de feux sans modification. La procédure de micro-régulation peut être aussi utilisée en fonctionnement normal.
- Les postes régionaux sont chargés de recalculer périodiquement, à partir des mesures transmises par les contrôleurs d'intersections, le plan de feux à appliquer. Ils fonctionnent de manière autonome (chaque poste régional pouvant prendre en charge jusqu'à 128 contrôleurs regroupés en sous-ensembles de 10 contrôleurs) et utilisent différents algorithmes pour choisir les meilleurs paramètres des plans. Les variations de durée de cycle, dans la limite  $\pm 6$  secondes, sont calculées à partir de l'intersection la plus chargée de chaque sous ensemble, de manière à annuler l'erreur entre le degré de saturation et un degré de saturation de référence. Ce degré de référence dépend de la valeur du cycle courant; il varie de 0,5 pour les cycles courts à 0,9 pour les cycles les plus longs. Les répartitions de vert et les décalages sont issus de votes entre différents plans de répartition de vert et de décalage en mémoire. Ce n'est pas une optimisation au sens propre du terme mais plutôt le choix des meilleures valeurs dans un ensemble limité de solutions.
- Le poste central de surveillance a pour but la visualisation en temps réel du système ainsi que des éventuels problèmes détectés.

Cette stratégie s'appuie sur des bibliothèques séparées de durées de cycle, de décalages et de durées de vert et sur un algorithme temps réel de reconstitution du plan de feux. Le plan de feu est ainsi reconstitué et non stocké tel quel dans une bibliothèque (Figure 2.5).

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

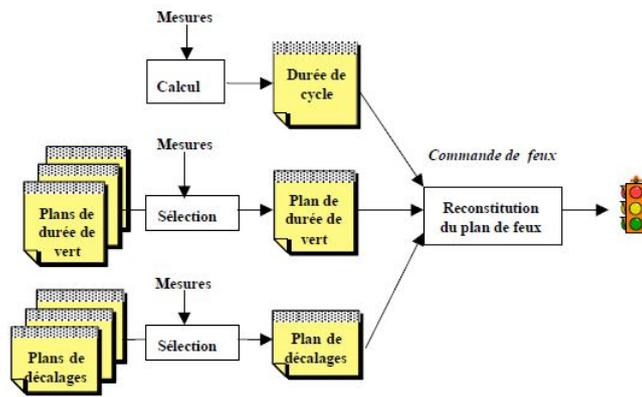


FIGURE 2.5 – Principes généraux de SCATS

Le jectif général est de minimiser les retards et les arrêts par choix des paramètres de base du système de régulation du trafic, tels que la durée de vert, les décalages et la durée de cycle. La régulation se décompose en deux niveaux : une régulation stratégique sur des ensembles d'intersection et une régulation tactique au niveau de chaque intersection.

#### b. Méthode de commande SCOOT

Les recherches menées depuis 1973 par le laboratoire anglais TRRL ont abouti au développement de la méthode SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimisation Technique), qui a été testée sur site dès 1981 [Hunt, P. B., et al. 1982]. SCOOT est une méthode de coordination et de commande d'un ensemble de carrefours qui ne nécessite qu'un capteur par voie (le plus éloigné possible de la ligne de feu idéalement en entrée de chaînon, c'est-à-dire à une dizaine de mètres en aval du carrefour précédent). Le principe général de SCOOT est d'ajuster par petits incréments successifs les paramètres des plans de feux de manière à répondre au mieux à la situation de trafic actuelle. Les carrefours contrôlés par SCOOT sont regroupés en différentes zones. Les intersections d'une même zone opèrent avec la même longueur de cycle. SCOOT dispose, toutefois, de la possibilité de faire fonctionner certains carrefours avec une durée de cycle deux fois plus faible. A partir de l'enregistrement du profil de la demande (SCOOT n'utilise pas le débit brut mais une mesure intégrant débit et l'occupation de la boucle afin de limiter les situations de congestion et les problèmes de remontée de queues) sur un cycle par le capteur, et grâce à un modèle de trafic (incluant la prise en charge de la dispersion des pelotons), SCOOT prédit l'évolution de la longueur de queues.

Un critère est alors créé à partir de la somme des valeurs moyennes de ces queues (moyenne sur un cycle). Ce critère peut aussi prendre en compte le nombre total d'arrêts de la région régulée. SCOOT réalise trois types de réglages :

- Répartition des verts : Au niveau de chaque carrefour, ce module décide, peu avant la

date de changement de phase, si cette date doit être maintenue, avancée ou reculée de quelques secondes, afin de minimiser le degré de saturation des chaînons entrants (défini par le nombre de véhicules arrivant par cycle sur le nombre de véhicules pouvant être écoulés).

- Décalages : Une fois par cycle et pour chaque carrefour, les décalages entre carrefours sont légèrement modifiés pour minimiser la somme des valeurs des critères des chaînons adjacents (minimisation locale). Les situations de congestion sont prises en compte en privilégiant la coordination des chaînons courts.
- Durée de cycle : Périodiquement (plusieurs minutes), ce module modifie de quelques secondes la durée du cycle de la zone, afin que le degré de saturation du chaînon le plus chargé se rapproche de 90%. Certaines jonctions de la zone peuvent passer en double cycle, si leur taux de saturation le permet. Mais le passage de simple à double cycle (ou de double à simple) introduit des discontinuités dans l'écoulement du trafic.

SCOOT modifie graduellement le plan de feux en cours dans le but de s'adapter aux variations des conditions de circulation. La modification du plan de feux consiste en de petites variations de la durée du cycle, durée de vert, et décalages ; les réglages à appliquer au niveau d'un carrefour sont tels qu'ils optimisent un indice de performance du réseau.

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

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

### **c. Méthode de commande UTOPIA**

Le système UTOPIA - Urban Traffic Optimization by Integrated Automation - a été créé en 1983, en Italie [Di Taranto et al., 1989], [Donati et al., 1984]. Il s'inscrit dans le cadre du projet "Progetto Torino" dont l'objectif est d'assurer de meilleures conditions de circulation aux véhicules de type transport en commun, sans cependant défavoriser les autres types de

véhicule. Il propose d'exploiter la coordination des feux de signalisation pour leur accorder la priorité. Implanté à Turin, il y est opérationnel depuis 1984.

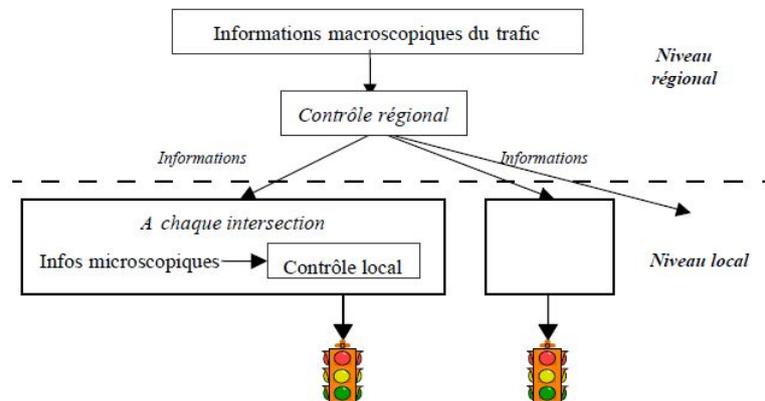


FIGURE 2.6 – Synoptique général de l'architecture de régulation de système UTOPIA

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

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

#### d. Méthode de commande PRODYN

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

Il n'existe plus, dans cette stratégie de régulation, de notion de plan de feux. La partie commande repose sur un processus de décision, se déroulant sur une période très courte, concluant soit de conserver les feux d'un carrefour dans leur état courant soit de les faire commuter dans l'état suivant. La décision est prise au terme d'un calcul d'optimisation déterminant une séquence optimale de commutations sur un horizon d'une longueur fixe. L'optimisation fait appel à des méthodes avancées de modélisation et d'optimisation telles que l'estimation bayésienne et la programmation dynamique. Comme pour UTOPIA, le problème de la régulation globale d'un réseau de carrefours est décomposé en de nombreux sous-problèmes de régulation locale, mis en œuvre au niveau de chaque carrefour. La coordination globale est ensuite assurée par un échange d'informations entre chaque carrefour et ses voisins immédiats.

## 2.5 Méthodes commande à base d'intelligence artificielle

Avec l'avancement de science les méthodes d'intelligence artificielle sont considéré comme des méthodes qui ne se base pas sur des modèles pour commande les feux de trafic dans les milieux urbains. L'utilisation de méthodes d'intelligence artificielle pour contrôler les feux de circulation a commencé dans des années 1990. Dans cette section, trois modèles de système d'intelligence artificielle sont examinés. La section 2.5.1 décrit les contributions de l'intelligence computationnelle et dans la section 2.5.2 fournisse brièvement le développement de multi-agent.

### 2.5.1 L'intelligence computationnelle

Les méthodes d'intelligence computationnelle (IC) sont des méthodes de commande très rentables pour faire face à la complexité et à la dynamique de la situation actuelle du trafic urbain. Les méthodes (IC) telles que : les systèmes flous, les réseaux neuronaux artificiels (NNA) et le Neuro-flou sont d'excellentes méthodes de commande des feux pour les

réseaux urbains.

**a. Systèmes flous**

Les systèmes de commande basés sur des données floues évaluent la situation du trafic en fonction d'un ensemble de règles (fonctions d'appartenance) et s'approchent d'une stratégie optimale de commande des feux de signalisation. [Lin et al.1997] ont proposé un modèle dynamique qui alimente les prévisions de trafic dans un contrôleur flou qui se rapproche de plan de synchronisation optimale en temps réel. Un contrôleur flou est implémenté dans [Yi Hu et al 2007] pour contrôler la durée de chaque phase de feux. [Kononen & Nittymaki, 2000] ont proposé deux types de méthode floue, à savoir Mamdani et Maximal flou similarité pour contrôler une jonction de trafic en ajustant le plan de synchronisation optimal. Les performances des deux méthodes sont comparées. [Lee et al.1999] ont étendu un contrôleur flou à deux niveaux avec une méthode de contrôle floue plus compliquée pour ajuster la séquence de phase et les durées de feux pour réguler le trafic aux intersections. Un système basé sur des règles floues proposé dans [Sheraz et al 2009] est de réguler le trafic aux intersections sursaturées. Sur la base des données de trafic, les règles décident d'étendre le signal vert actuel ou de le terminer. Pour plus de détails sur les systèmes de logique flous pour la commande des feux de trafic, le lecteur peut se référer au [Sharma, N. & Sahu, S., 2016].

**b. Les réseaux neuronaux artificiels**

Le NNA traite des données avec le concept qui est similaire au cerveau. Il mémorise les données d'entraînement en mettant à jour les poids des neurones. Par conséquent, il est capable comme une méthode d'auto-apprentissage qui peut mémoriser et reconnaître les caractéristiques et les modèles. Différents types de NNA ont été appliqués aux trafics urbains où ils se sont avérés être des modèles de prévision utiles. Un procédé de reconnaissance de formes utilisant l'alimentation en avant de NNA est développé pour estimer les profils de trafic en utilisant l'entrée des détecteurs [Gundogan, F. & Fellendorf, M., 2011]. Le procédé est également capable de sélectionner des plans de synchronisation de feux appropriés en prévision de motifs de trafic anormaux [Xiaojian et al. 2009]. Les flux de trafic croisés prévus en utilisant la propagation arrière (BP) NNA. Le travail est capable de prévoir le flux de circulation à court terme au carrefour. BP NNA est également appliquée dans [Feng, J & Sun, S. 2008] pour l'estimation du flux de trafic. Dans [Liu, P. 2007], il est appliqué pour la détection des accidents aux intersections. Par conséquent, un système de commande pour la récupération d'intersection pour les accidents est mis en œuvre. D'autres types de NNA tels que probabilistes NN [Wen, H et al., 2001] et récurrents NN [Feng Qian, 2008] ont été utilisés

pour la prévision d'incident et modéliser le flux de trafic respectivement.

### c. **Neuro-flou**

Comme le contrôle de la circulation urbaine vise à posséder à la fois des capacités de prédiction et de prise de décision, il est une nouvelle pratique d'intégrer à la fois le système flou et NNA pour atteindre un contrôle de trafic plus efficace. Un réseau de neurones flou (NNF) est développé dans [Lilin Zang et al. 2006] pour le contrôle des feux de circulation. Alors que le NN apprend les modèles de flux de trafic, il effectue un accord sur les règles floues et optimise les paramètres du système. Il en est résulté un ensemble de règles floues variables qui peuvent s'adapter aux conditions de circulation variables. Un travail similaire sur l'utilisation de NN pour ajuster la fonction d'appartenance d'un contrôleur flou pour s'adapter à des situations de trafic imprévisibles se trouve dans [Wannige, C.T. & Sonnadara, D.U.J., 2008]. Ce contrôleur neuro-flou se comportait mieux que le contrôleur à temps fixe. Cependant, le contrôleur neuro-flou doit être formé avec différentes données d'entrée. La méthode est simulée pour le contrôle du signal à deux jonctions de trafic à quatre voies [Wannige, C.T. & Sonnadara, D.U.J., 2009] pour minimiser les retards subis par le conducteur par le réglage du temps de feu vert par le système de contrôle flou.

## 2.5.2 **Système multi-agents**

Une autre méthode de système intelligent émergents est un système multi-agents (SMA). Il se compose de plusieurs agents intelligents qui interagissent les uns avec les autres pour résoudre des problèmes qui sont trop difficiles pour un système monolithique à résoudre. SMA est une décomposition d'un système à plusieurs agents qui interagissent les uns avec les autres pour atteindre un objectif global souhaité. Dans le système à base d'agents, le système de circulation est composé de sous-systèmes distribués collaborant les uns avec les autres pour exécuter le contrôle et la gestion du trafic sur la base de mesures de trafic en temps réel. Dans [Balaji, P.G. & Srinivasan, D., 2010], un contrôle de la circulation en réponse SMA comprend des agents qui sont des contrôleurs de la circulation pour une intersection dans un réseau de trafic. Chaque agent utilise un processus d'apprentissage en ligne en plusieurs étapes pour mettre à jour ses procédures de base de données et la prise de décision. Chaque agent partage également un NNF d'optimisation. Un autre exemple de SMA est développé par [Guo et al. 2003]. Dans ce travail, chaque agent emploie groupe de soutien du système de prise de décision (GDSS). En intégrant GDSS des agents à la fois central et intersection, intelligent et auto-décision dans le contrôle en temps réel du trafic est mis en œuvre. Alors que CI a montré de nouvelles méthodologies dans le contrôle optimisé des trafics, SMA peut

être considérée comme une architecture de conception et d'application qui peut contenir toute technologie sous son architecture. Pour un examen plus complet de CI et le MAS, le lecteur peut se référer respectivement à [Zhao, D.& Dai, Y, 2012] et [Chen, B. & Cheng, H.H, 2010].

## **2.6 Méthodes de commande avec modèle**

### **2.6.1 Modèle mathématique**

Avec les avancées dans le calcul numérique et les nouvelles méthodes d'optimisation plus efficaces, plusieurs nouvelles stratégies de commande des feux de trafic ont été conçues et développées. Généralement, dans ce domaine, deux types de modèles sont proposés :

#### **a. Les modèles basés sur la bande passante (bandwidth-based models)**

[Morgan et Little ,1964] est le premier travail qui à été proposée pour maximiser la bande passante ou vague verte «Green wave» pour augmenter les chances de véhicules traversant une artère sans arrêt. « Little's MIP formulation » est proposée par [Little, 1966] pour maximiser la bande passante dans les deux sens pour synchroniser des signaux le long des artères, on obtient des décalages relatifs qui maximisent la bande passante en utilisant une méthode de branche et band solution. Un autre modèle de bande passante largement utilisé est le modèle PASSER-II développé par [Messer et al 1973]. Le modèle a été prouvé d'être une approche flexible et robuste pour la synchronisation des feux. [Gartner et Stamatiadis, 2002] ont suivi le même concept et ont formulé une multi-bande / programme d'optimisation pour une artère.

### **b. Les modèles basés sur la performance (performance-based models)**

Ces méthodes ont été développées pour calculer des plans de feux sur des intersections complexes ou sur des réseaux de carrefours. Elles utilisent des modèles d'écoulement du trafic permettant d'évaluer les performances d'un plan de feux en terme d'un critère (temps perdu, nombre d'arrêts, émission de polluant, consommation de carburant...). Les paramètres des plans de feux sont alors réglés de manière à optimiser ce critère.

[Abu-Lebdeh & Benekohal, 2000] ont proposé une stratégie utilisant les algorithmes génétiques pour l'optimisation des feux de signalisation dans une artère bidirectionnelle. D'autres travaux proposent des modèles d'optimisation [Lieberman et al. 2000 ; Lertworawanich et al. 2011 ; Hajbabaie & Benekohal 2015]. Celles-ci pourraient être couplés avec un outil de simulation de trafic microscopique afin de déterminer efficacement en boucle ouverte les paramètres de synchronisation du signal optimales ou quasi optimales dans des conditions de sursaturation de l'artère.

Une récente famille de stratégies est en développement aux États-unis. Elles se basent sur une approximation numérique convergente du modèle LWR. Cette approximation a été introduite par [Daganzo, C.F., 1994]. Sa formulation en milieu urbain est introduite en 1995 [Daganzo, C.F., 1995]. L'approximation se base sur la décomposition d'un tronçon de route en des cellules élémentaires dont la longueur dépend de la vitesse du flot et de l'intervalle temporel d'échantillonnage. Cette approximation est connue sous le nom de "The cell transmission model ". [Lo et al. 2001] ont proposé le système DISCO qui se base sur le même modèle que [Lo, H.K , 1999] mais qui permet de traiter des réseaux plus larges. La programmation mixte en nombre entier a été remplacée par les algorithmes génétiques pour pouvoir appliquer la stratégie en temps réel.

Toujours utilisant "The cell transmission model ", Beard et Ziliaskopoulos [Beard Ziliaskopoulos, 2006] ont introduit une stratégie combinant l'optimisation des plans de feu et la résolution d'un problème d'affectation dynamique. L'objectif de la stratégie est de minimiser les temps de parcours dans le réseau. [Teodorović, D., 2008] a mis l'accent sur l'utilisation des méta-heuristiques basées sur les populations dans l'ingénierie du transport et en particulier dans la régulation du trafic.

## **2.6.2 Modèles graphiques**

Récemment les chercheurs ont introduit des modèles graphiques puissants tels que : Les réseaux de Petri (RdP) et l'automate hybride (AH). Ces formalismes graphiques ont été prouvés comme des outils puissants pour la modélisation, l'analyse et la commande du système

de transport complexe. [Kim, Y., 2010.]

#### a. Réseau de Petri

Réseau de Petri (RdP), qui est originaire de [Petri. C. A, 1962] a trouvé son application dans différents domaines d'applications tels que : Protocoles de communication, logiciel distribué et des systèmes des bases données, les systèmes de commande de fabrication flexibles, systèmes à événements discrets, système dynamique hybride, la logique programmable et des tableaux VLSI. Les RdP est l'un des formalismes graphiques qui a été prouvé comme un outil puissant pour la modélisation, l'analyse et le contrôle des systèmes du trafic [Murata, 1989; Liu, D. et al., 2010]. Dans [Ng, K.M., Reaz, M.B.I. & Ali, M.A.M., 2013], les auteurs donnent une bonne revue sur l'application des RdP et différentes versions pour la modélisation et la commande des intersections et des réseaux artériels.

Dans le cadre de la modélisation microscopique, le système de trafic urbain peut être considéré comme un système d'événements discrets (SED), les modèles microscopiques capturent le comportement de chaque véhicule, tels que les paramètres du pilote (par exemple, l'agressivité, le temps de réaction, etc.) et les paramètres de chaque véhicule (par exemple la masse, l'accélération, etc.) se déplaçant dans le flux de la circulation.

Les RdP discrets sont utilisés pour la modélisation, l'analyse et la commande du comportement complexe de système de transport urbain comportement. [Febbraro Giglio, 2004] ont appliquées le RdP temporels déterministe (RdPTD) pour un modèle microscopique d'une zone du trafic urbaine constitué d'intersections et des feux de signalisation, La modularité est introduite dans lequel le modèle microscopique est défini comme une intégration de quelques sous-modèles RdPTD qui peuvent être exprimées sous forme d'équations d'état. Dans [Badamchizadeh Joroughi 2010] une autre version de RdP appelé RdP déterministes et stochastiques (RdPDS) sont appliquées pour commande les feux de signalisation dans des intersections. En outre, les RdPDS sont également utilisés pour une stratégie de commande de trafic dans le réseau urbain dans différentes conditions d'écoulement du trafic [Di Febbraro, A., Giglio, D. Sacco, N., 2016]. Dans [Yi-Sheng Huang, Yi-Shun Weng & MengChu Zhou, 2014], les auteurs utilisent les RdP temporisés afin de présenter tous les états dans un modèle RdPT complexe du système de trafic urbain. Cependant, dans une large échelle d'un réseau du trafic, le nombre de véhicules est très grande et par conséquent le modèle RdP va avoir un nombre de jetons très grands, donc une explosion des états accessibles est présente dans ce type de modélisation ce qui constitue une limitation pratique de RdP discret [Alla & David 1998a].

Une modélisation continue est introduit pour donner un sens global du flux de trafic

en fonction de l'approche macroscopique, afin de remédier à l'inconvénient. Les réseaux de Petri continus (RdPC) ont été introduites afin d'éviter le problème d'explosion d'état [Alla and David 1998a]. Dans [Tolba, 2004], l'auteur a proposé un modèle RdPC à vitesse variable de flux de trafic et considère le trafic comme un système hétérogène qui peut être décrit du point de vue macroscopique. Dans [Michal, K & Zdenek, H. 2009], une commande des feux de signalisation a été proposée basée sur les RdPC à vitesse constante. [Julvez, J.J. & Boel, R.K., 2010] a proposé un modèle macroscopique basé sur les réseaux de Petri continus comme un outil pour la conception d'un contrôleur adaptative de feux de trafic qui améliorent le comportement des systèmes de circulation en temps réel.

Ce dernier modèle est insuffisant pour modéliser le comportement complexe de la dynamique des flux de trafic dans l'intersection à feux de signalisation où le flux de trafic est considéré comme système continu qui peut être modélisé par les RdPC et les feux de trafic sont considérés comme un système à événements discrets, et peut être représenté par les RdP temporisés. La combinaison des deux systèmes donne un système dynamique hybride (SDH). Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche ont été menés au cours des dernières années. Les premiers travaux ont porté sur l'utilisation des réseaux de Petri hybrides (RdPH) pour modéliser et contrôler une intersection à feux et présenté dans les travaux de [Di Febbraro et al, 1998]. [Di Febbraro et al.2004]. [Chen, F. & wang, li, 2014] ont proposé une stratégie de contrôle basée sur les réseaux de Petri hybride pour réduire l'effet de perturbation du trafic en utilisant des phases supplémentaires. Dans [Jbira, k & AHMED, M, 2011], les auteurs traitent de l'élaboration d'un modèle RdP hybride générique décrivant les flux physiques des véhicules et la commande des intersections à feux. Le modèle proposé peut facilement être traduit en un code de commande pour la mise en œuvre en temps réel. Cependant, de point de vue de l'analyse formelle, ces méthodes présentent toujours un nombre élevé d'états atteints dans le modèle et peut présenter des comportements interdits qui n'existent pas dans le système réel. Par conséquent, il est difficile d'adapter une méthodologie de commande.

### b. Les Automates hybrides

Les automates hybrides [Alur et al., 1993], représentent une extension des automates à états finis. Ce sont des systèmes qui intègrent deux composantes :

- Une composante ayant un comportement discret, naturellement modélisée par un automate à états finis
- Une composante dont le comportement varie de façon continue dans le temps, modélisée par un système d'équations différentielles.

L'évolution d'un automate hybride est caractérisée par une alternance de pas continus, où les variables d'état et le temps progressent de façon continue, et de pas discrets où plusieurs transitions discrètes et instantanées peuvent être franchies.

Ainsi, d'un point de vue informel et général, un automate hybride apparaît ainsi comme un automate à états finis pilotant un ensemble d'équations différentielles qui modélise la dynamique continue du système.

Le modèle automate hybride se compose d'un ensemble fini de variables, noté  $X$ , et d'un graphe orienté, noté  $(S, E)$ , où l'ensemble  $S$  est composé par les sommets du graphe et les éléments de l'ensemble  $E$  représentent les transitions discrètes. L'état de l'automate change instantanément à l'occurrence d'un événement discret ou par la validation d'une condition logique spécifiée sur la valeur de la variable continue [Henzinger, 1996].

Soit l'automate illustré dans la figure 2.7 modélisant une tronçon de la route. Dans ce modèle :

- L'évolution continue est représentée par des équations différentielles associées aux sommets du graphe.
- L'évolution événementielle est modélisée par les arcs étiquetés des graphes.

Les sommets « Eteint » et « Allumé » représentent les états discrets du système où l'évolution continue a lieu.  $x$  représente le nombre des véhicules.

Les prédicats  $0 \leq x \leq 24$  dans les sommets constituent les invariants de l'automate, c'est-à-dire, des conditions imposées aux variables continues du système pour rester dans un état discret (dans notre cas, les états « Eteint » ou « Allumé »). L'arc d'entrée au sommet d'origine « Eteint » symbolise l'état initial du système. L'évolution de variable  $x$  dans le sommet « Eteint », respectivement le sommet « Allumé », se fait conformément aux équations différentielle  $\dot{x} = -0.1$  respectivement  $\dot{x} = 0.2$  appelées conditions de flux ( $\dot{x}$  désigne la dérivée du premier ordre par rapport au temps de la variable  $x$ ).

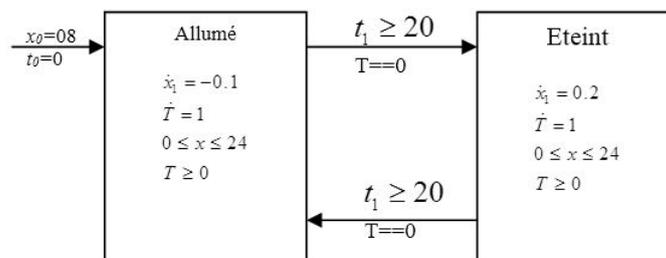


FIGURE 2.7 – Exemple d'automate hybride

L'analyse et la commande des systèmes à travers l'utilisation des automates hybrides oc-

cupent une place considérable dans l'étude des SDH. Il est question de vérifier certaines propriétés qualitatives et quantitatives sur un système grâce à l'exploitation des méthodes relevant de l'informatique et de l'automatique. La commande se base, d'abord, sur une modélisation de SDH à vérifier par un automate hybride. Elle repose ensuite, sur l'application d'une analyse des propriétés à travers les techniques de model-checking (Henzinger et al., 1997), et à travers l'analyse d'atteignabilité (Alur et al. , 1993, 1995).

En raison de la facilité de manipulation formelle et sa puissance d'analyse, Automate hybride (AH) Différentes classes d'AH sont utilisés pour la conception et la synthèse de commande dans les systèmes de transport voir par exemple [Zhao & Chen 2003; Herman Sutarto & René Boel 2010; Chen et al 2015]. D'une manière générale, les AH sont des modèles qui permettent une manipulation formelle facile mais sont difficilement utilisables pour la modélisation. En outre, pour la modélisation du comportement du trafic, les AH ne sont pas très recommandé, certaines limitations sont mentionnées ci-dessous.

- En raison de la complexité d'un comportement, il sera difficile de modéliser tous les comportements possibles, à savoir, il sera pratiquement impossible de prévoir tous les modes de fonctionnement dans AH formalisme.
- Le nombre élevé de variables dans les systèmes de transport augmente considérablement la taille des automates hybrides.

## 2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les méthodes de régulation du trafic urbain, nous sommes focalisés sur la commande via les feux de signalisation dans les zones urbaines. Nous avons décrits les différentes stratégies de régulation des flux de trafic via les feux à savoir les stratégies avec et sans notion de cycle, les technique de commande en boucle ouverte et en boucle fermée et avec ou sans modèle.

De l'étude des principales stratégies de commande, on peut retenir la supériorité des méthodes de commande avec modèle sur les autres stratégies de commande. Ce qui démontre tout l'intérêt de prendre en considération les différents phénomènes de trafic qui se produit dans le système de trafic, ceci nous préemptent d'éviter la congestion et d'améliorer le plan de feux.

La démarche de modélisation adoptée dans cette thèse est basée sur l'approche macroscopique du trafic routier, elle se classe parmi les méthodes avec modèle ou nous allons proposer un modèle combiné par couplage de deux modèles graphiques les Réseau de Pétri

hybride et des automates hybrides.

## Chapitre 3

# Modélisation et analyse d'un réseau de trafic urbain par réseau de Pétri hybride et l'automate hybride

*« La science, c'est ce que le père enseigne à son fils. La technologie, c'est ce que le fils enseigne à son papa. »*

---

citation

## 3.1 Introduction

Afin de pouvoir synthétiser une commande pour le système du trafic ; il est nécessaire de procéder à sa représentation de manière à faciliter son contrôle. Dans cette idée, ce chapitre vise à rapprocher le comportement de la circulation à un modèle en faisant appel à deux outils de modélisation les plus répandus dans le domaine du trafic et qui sont les réseaux de Petri hybride (RdPH) et l'automate hybride (AH).

Tout d'abord, nous recherchons le modèle en RdPH pour nous projetons ce modèle par un algorithme de traduction en un modèle AH facile à analyser. A travers cette étude, nous dégagons les limitations et les avantages de chaque représentation et nous détaillons la procédure d'élaboration du modèle de trafic hybride.

## 3.2 Les réseaux de Pétri

Depuis leurs introductions dans les années soixante [Pétri, 1962], les réseaux de Pétri (RdP) apparaissent dans un nombre important d'applications tels que : les systèmes de télécommunication, les réseaux de transports, les systèmes automatisés de production, . . . , etc. Grâce à leurs caractéristiques graphiques et mathématiques, ils ont un rôle prépondérant dans l'étude formelle des systèmes à événements discrets (parallèles ou concurrents). En outre, la diversité de leurs extensions l'en fait un outil polyvalent avec lequel des systèmes complexes peuvent être modélisés. C'est pour tenter de modéliser des comportements plus complexes que différentes extensions du modèle RdP autonome (ordinaire) ont été proposées : RdP temporisé [Chretienne, 1983], RdP continu [David, R. & Alla, H., 1987], RdP stochastiques [Natkin, 1980; Haddad & Moreaux, 2001], RdP hybrides [Le Bail et al., 1991], RdP lots [Demongodin, 1994], RdP colorés [Jensen, 1992], . . . etc.

Dans ce chapitre, nous allons exploiter les RdP autonomes, temporisés, continus et hybrides.

### 3.2.1 Les réseaux de Petri autonomes

Intuitivement, la structure d'un RdP autonome est composée de cinq objets [Vidal Naquet et Choquet Geniet, 1992] :

- **Les places** correspondent à des sites, notées graphiquement par des cercles ;
- **Le marquage d'une place** représentant l'état d'un nœud est un nombre entier (non

négatif et indivisible) de jetons (marques) pouvant simuler les activités dynamiques ;

- **Les transitions** correspondent aux événements, notées graphiquement par des barres ou des rectangles ;
- **Les arcs** notés par des flèches relient les places aux transitions et vice versa ;
- **La fonction de transition** fournit à chaque transition (événement) les conditions qui doivent être remplies pour chacun des nœuds afin que cet événement soit possible. Elle indique aussi l'effet de chaque transition sur l'état des nœuds ;

Un RdP peut être également vu comme un graphe biparti constitué d'un ensemble de sommets composé par des places et des transitions.

Formellement, un RdP autonome est un quintuple  $RdP = (P, T, Pre, Post, m_0)$

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble fini de  $n$  places.
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble fini de  $m$  transitions.
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de pré-incidence telle que  $Pre(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $P_i$  vers  $T_j$ .
- $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  est la fonction de post-incidence telle que  $Post(P_i, T_j)$  est le poids de l'arc dirigé de  $T_j$  vers  $P_i$ .
- $m_0$  : est le vecteur de marquage initial dans lequel chaque place du RdP peut contenir  $0, 1, 2, \dots, k$  jetons

L'évolution d'un RdP, c'est-à-dire la transition entre deux marquages, suivant la règle suivante : le modèle peut effectuer la transition d'un marquage vers un marquage suivant lorsque toutes les conditions relatives à cette transition sont remplies. Dans un RdP autonome, le comportement peut évoluer lorsque toutes les places relatives à une transition contiendront un nombre suffisant de jetons. En d'autres termes, lorsque le nombre de jetons dans chaque place entrée d'une transition est supérieur ou égal à 1, dans ce cas, la transition est sensibilisée et sera franchissable. Lorsque la transition est franchie (ou tirée), son franchissement définit le marquage suivant du RdP. L'état du réseau est défini par le nombre de jetons dans chaque place qui est représenté par le vecteur de marquage  $M = [M(P_1), \dots, M(P_n)]^T$  où  $M(P_i)$  (noté aussi  $m_i$ ) désigne le nombre de jetons dans la place  $P_i$ . Formellement, la dynamique d'un RdP autonome est définie par l'équation fondamentale suivante :

$$M(k+1) = M(k) + W\bar{S} \quad (3.1)$$

où  $W$  est la matrice d'incidence (de dimension  $m \times n$  éléments) définie par :

$$W = [w_{ij}] \quad (3.2)$$

Les éléments de  $W$  sont donnés par :

$$w_{ij} = Post(P_i, T_j) - Pré(P_i, T_j) \quad (3.3)$$

$S_k = [s_1, \dots, s_n]^T$  désigne le vecteur caractéristique (de dimension  $n \times 1$ ) de la séquence de franchissement  $S_k$  réalisable à partir du marquage initial  $M(k+1)$ . Toutes les composantes de  $S_k$  sont nulles sauf celles qui correspondent aux transitions franchies dans la séquence  $S_k$ . La valeur de chaque composante  $j$  du vecteur  $S_k$  indique le nombre de franchissements de la transition  $T_j$  dans la séquence de franchissement  $S_k$ . Lorsqu'une place  $P_i$  du RdP possède au moins deux transitions de sortie ( $N \geq 2$ ), un conflit structurel apparaît. Ce conflit devient effectif lorsque le nombre de jetons ( $m_i$ ) de cette place est inférieur à la somme des poids des arcs reliant cette place aux transitions de sortie.

$$0 < m_i < \sum_{j=1}^N Pré(P_i, T_j) \quad (3.4)$$

La résolution de tel problème s'effectue par l'entremise des règles de priorité sur les transitions de sortie de  $P_i$ . Nous en verrons l'une des méthodes de résolution dans la section suivante.

### 3.2.2 Les réseaux de RdP T-temporisés

Les RdP T-temporisés ont été introduits dans le but de modéliser des systèmes ayant un fonctionnement dépendant du temps. La notion du temps dans un RdP temporisé intervient pour décrire la durée nécessaire à l'accomplissement d'une opération. En d'autres termes, la temporisation indique la durée entre le début et la fin d'une opération. Cette temporisation peut être associée soit aux places soit aux transitions. Il en résulte donc deux types des RdP T-temporisés : RdP P-temporisés et RdP T-temporisés. Ici nous ne présentons que les RdP T-temporisés, pour plus de détails sur les RdP P-temporisés, le lecteur pourra se référer à [David, R. & Alla, H., 1992].

Un RdP T-temporisé est un doublet  $\langle \mathbf{Q}, \mathbf{Tempo} \rangle$  tels que :

- $\mathbf{Q}$  est un RdP ordinaire marqué.
- $\mathbf{Tempo}$  est une application de l'ensemble  $T_j$  des transitions dans l'ensemble des rationnels,  $Tempo(T_j) = d_j$  qui représente la temporisation associée à la transition  $T_j$ .

### 3.2.3 Les réseaux de Pétri continus

Les RdP continus ont été introduire par [David, R. & Alla, H., 1987] comme une limite des RdP discrets, dans le but d'éviter l'explosion combinatoire du nombre d'états accessible. Il est obtenu à partir de RdP discrets en fluidifiant les marques. Une place d'un RdP continu est dite place continue ou C-place. Son marquage est un nombre réel positif ou nul. De même, une transition dans un RdP continu est dite transition continue, ou C-transition, elle est validée si toutes ses places d'entrée sont marquées. A l'inverse des RdP discrets où le franchissement d'une transition est un événement instantané, une C-transition est franchie continuellement dans le temps. Cette extension du RdP permet d'élargir le cadre des RdP aux systèmes qui ne sont pas modélisables par des RdP ordinaires (tels que l'écoulement d'un fluide dans un réservoir, la production des produits par lot,...etc) [David, R. & Alla, H., 1992]. Contrairement aux RdP ordinaires ou temporisés, le nombre de marques dans les RdP continus est un réel positif; Le franchissement s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse traduite par le nombre de marques franchies pendant une unité de temps. Le franchissement d'une transition dans les RdP continus suit dans le cas général la loi régissant la dynamique du système étudié. Dans ce cadre, plusieurs extensions des RdP continus ont été proposées : le RdP continu à Vitesses Variables [David, R. & Alla, H., 1992, Tolba, C., 2004], le RdP continu à vitesse constante (RdPCC) [David, R. & Alla, H., 1992], le RdP continu Asymptotique [Bail et al. 93], le RdP continu à Vitesses Fonction du Temps [Dubois et al. 94]. Dans notre thèse, nous nous attacherons uniquement aux RdP continus à vitesses constant (RdPCC). D'une manière formelle, un RdPCC est sextuple :  $RdPCC = (P, T, V, Pre, Post, m_0)$

La définition de  $P, T, Pré, Post$  sont similaires à ceux de PN ordinaire marqué,  $m_0$  est le marquage intaille.  $V$  est une application de  $T$  transition  $V : T \rightarrow \mathcal{R}^+$ .  $T_j \rightarrow V_j$  il correspond à la vitesse de franchissement maximale de la transition  $T_j$ ; Le fonctionnement de ce modèle est clairement exprime à travers l'équation fondamentale d'un RdP. L'équation fondamentale du RdP discret qui est présentée dans l'équation 3.1 devient pour un RdPCC :

$$\dot{M} = W\bar{S} \quad (3.5)$$

Ou  $W$  est la matrice d'incidence du RdP continu.

### 3.2.4 Les réseaux de Petri hybrides

Les réseaux de Petri hybrides [David, R. & Alla, H. 01] contenant des nœuds discrets (des D-places et des D-transitions) et des nœuds continus (des C-places et des C-transitions) permettent de représenter au sein d'un même formalisme ce couplage entre un fonctionne-

ment continu et un fonctionnement logique (représentation graphique unifiée des variables continues et des variables discrètes). Dans les réseaux de Petri hybrides, la représentation des systèmes à comportements hétérogènes, appelés systèmes dynamique hybrides (SDH), est décrite par deux parties différentes :

- une partie continue dont le comportement est décrit par un RdP continu;
- une partie discrète modélisée par un RdP temporisé (à temporisation déterministe ou stochastique);

Un RdP hybride (RdPH) est une extension des RdP qui conjugue deux variantes de RdP. Formellement, un RdPH est défini comme suit :

**Définition 2.1 :** Un RdP hybride est une structure  $RdPH = (P, T, h, \Delta, \Sigma, Pre, Post, FS, I, m_0)$

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$  est un ensemble de  $n$  places;  
 $P = P^C \cup P^D$  avec :  $P^C$  est l'ensemble fini des places continues (C-place), and  $P^D$  est l'ensemble fini de places discrètes;
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$  est un ensemble de  $m$  transitions;  
 $T = T^C \cup T^D$  avec  $T^C$  est l'ensemble fini de transitions continues (ou C-transition)  $T^D$  est l'ensemble fini de transitions discrètes (ou D-transition);
- $h : P \cup T \rightarrow \{C, D\}$  est une fonction hybride indique si chaque nœud discret ou continu;
- $\Delta$  est un ensemble fini d'événements;
- $\Sigma : T^D \rightarrow \Delta$  est une fonction qui associe à chaque transition discrète un événement de  $\Delta$ ;
- $Pre : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  and  $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  désignent respectivement les applications d'incidence avant et arrière; ces applications doivent satisfaire la condition suivante

$$\forall (P, T) \in P^C \times T^D, Pre(P, T) = Post(P, T)$$

- $FS : T^C \rightarrow \mathbb{R}^+$  est une application qui associe à chaque transition continue sa vitesse maximale de franchissement;
- $I : T^D \rightarrow \mathbb{R}^+ \times (\mathbb{R}^+ \cup \{\infty\})$  est une application qui associe a chaque D-transition la durée de sa temporisation;
- $m_0$  : est le marquage initial, les D-places contiennent un marquage entier positif et les C-places contiennent un marquage réel positif;

La condition sur les applications d'incidence avant et arrière est repérée sur le RdP par des boucles reliant les D-Places aux C-transitions, elle signifie qu'une marque discrète ne

peut pas être fluidifiée par une transition continue. Le modèle RdP hybride ainsi défini permet donc la modélisation des conditions logiques influant sur le comportement du système, mais il permet aussi la modélisation de transformation de marques continues en marques discrètes et vice-versa (par exemple : formation et éclatement de lots,..etc).

### 3.3 Modèle d'écoulement du flux trafic par les réseaux de Pétri hybrides

#### 3.3.1 Modélisation d'un tronçon du trafic urbain

Un tronçon urbain isolé est considéré dans ce travail afin de présenter l'analogie entre un tronçon de la route et la dynamique des fluides dans un réservoir hydraulique. La circulation des flux des véhicules dans ce tronçon est supposée continue et stationnaire : débit ( $q(x, t)$ ), densité ( $\rho(x, t)$ ) et vitesse varient peu autour de leurs moyennes respectives).

**Hypothèse 1 :** Afin de simplifier notre étude, nous considérons que le débit des véhicules est constant durant une période donnée  $T$ .

La modélisation de l'écoulement du trafic est réalisée le plus souvent à l'aide d'un modèle macroscopique du premier ordre. Ce modèle est basé sur l'analogie avec la dynamique des fluides. Assimila le flux du trafic dans un tronçon supposé homogène et unidirectionnel, à un fluide dans un réservoir [Dimou.C, 2012][Bouriachi et al. 2013] . La figure 3.1 représente l'analogie entre ces deux dynamiques.

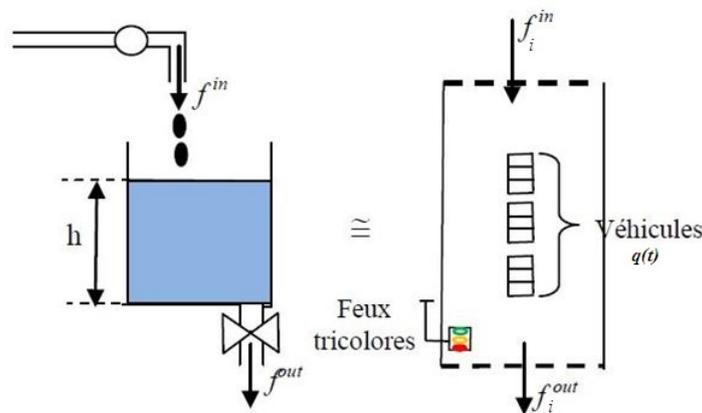


FIGURE 3.1 – Analogie entre un tronçon de la route et un réservoir hydraulique

Le modèle macroscopique du premier ordre s'articule principalement sur trois postulats de base :

- a. **Le principe de continuité** : L'analogie de l'écoulement des flots de véhicules avec les fluides compressibles conduit à considérer la dynamique du trafic comme étant un milieu continu. Sous cette hypothèse, les variables moyennes de trafic : débit, densité et vitesse sont considérées comme des fonctions continues.
- b. **L'équation de conservation de la masse** : Contrairement au principe de continuité sur lequel diverses réserves peuvent être émises, le principe de conservation de la masse correspond à la réalité du trafic. Il est défini comme suit [Cohen, 1990] : la variation du nombre de véhicules sur un tronçon de route est égale à la différence entre la masse entrant et la masse sortant durant l'intervalle de temps  $t_1$  et  $t_2$  :

$$\frac{\partial \rho(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial f(x, t)}{\partial \Delta x} = 0 \quad (3.6)$$

L'équation 3.6 discrétisée dans l'espace est donnée par l'expression suivante [Mahmassani, 2001] :

$$\frac{d\rho_i(t)}{dt} + \frac{f_i^{in} - f_i^{out}}{\Delta_i} = 0 \quad (3.7)$$

La relation entre la file d'attente et la densité est définie par :

$$\rho_i(t) = \frac{q_i(t)}{\Delta_i} \quad (3.8)$$

D'après 3.7 et 3.8, on aboutit à l'équation de la dynamique de la file d'attente suivante :

$$\dot{q}_i(t) = f_i^{in}(t) - f_i^{out}(t) \text{ avec } q(0)=q_0 \quad (3.9)$$

ou :  $q_i(t)$  représente la queue (file d'attente) dans une tronçon exprimée en véhicule [veh].  $f_i^{in}(t)$  et  $f_i^{out}(t)$  sont respectivement le débit d'entrée et le débit de sortie.

- c. **Diagramme fondamental** : Le premier diagramme fondamental a été proposé par Greenshields dans [Greenshields, 1935] suite à des mesures expérimentales. Un grand nombre de diagrammes a été proposé depuis afin d'améliorer la description de l'écoulement. Tous ces diagrammes partagent certaines propriétés de bon sens :

- quand la densité est proche de 0, les interactions entre véhicules sont très limitées (car il y a peu de véhicules), donc ces véhicules roulent à leur vitesse maximale désirée, ce qui se traduit par une borne sur la vitesse du flot, notée **A**;
- quand la densité augmente, les interactions entre véhicules sont de plus en plus fortes, donc leur vitesse diminue;
- la densité est bornée par une certaine valeur, notée **C** (cette borne correspond au cas limite d'une route sur laquelle tous les véhicules sont arrêtés les uns derrière les autres)

Le diagramme de Greenshields suppose tout simplement que la décroissance de la vitesse avec la densité est linéaire. En remarquant que le débit est égal au produit entre la vitesse et la concentration, on obtient un diagramme fondamental en débit de forme parabolique, comme le montre la figure 3.2.

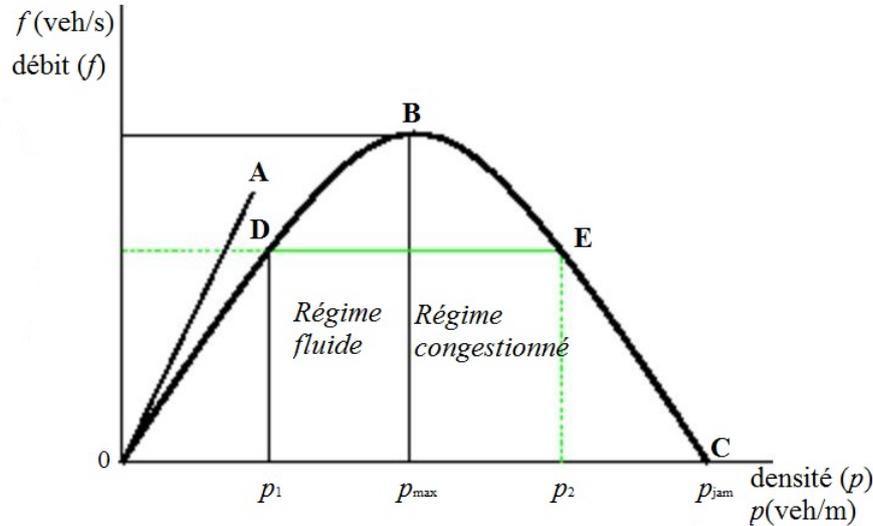


FIGURE 3.2 – Diagramme de Greenshields

L'intérêt du diagramme en débit par rapport à celui en vitesse est qu'il fait apparaître deux régimes d'écoulement, la limite entre les deux correspond à un état dit critique dont la densité est notée  $\rho_{max}$  (on notera **B** la vitesse correspondante). Le premier est le régime fluide pour lequel une augmentation de la densité se traduit par une augmentation du débit. Le second est le régime congestionné qui se traduit par une diminution du débit quand la densité augmente.

### 3.3.1.1 Modèle RdPCC d'écoulement de flux de trafic

Dans ce paragraphe, à l'aide de la discrétisation spatio-temporelle du modèle du premier ordre, nous présentons le modèle RdPCC permettant de modéliser l'écoulement du trafic (figure 3.3). Chaque tronçon est représenté par une place  $P_i$  dans laquelle le marquage  $m_i$  représente le nombre de véhicules présents sur ce tronçon. Le nombre d'emplacements disponibles sur un tronçon est représenté par le marquage  $C_i^{max} - x_i(t)$  de la place  $P_i$ .  $C_i^{max}$  est la capacité maximale du tronçon. L'entrée de chaque tronçon est modélisée par la transition  $T_i$ , ou la vitesse de franchissement instantané  $f_{s_i}(t)$  de la transition continue  $T_i$  traduisant le nombre de véhicules franchis par unité de temps. Les vitesses maximales de franchissements sont présentées par  $FS_i^{in}$  et  $FS_i^{out}$ .

Selon le principe de l'évolution de RdPCC [David, R. & Alla, H., 2001], les expressions

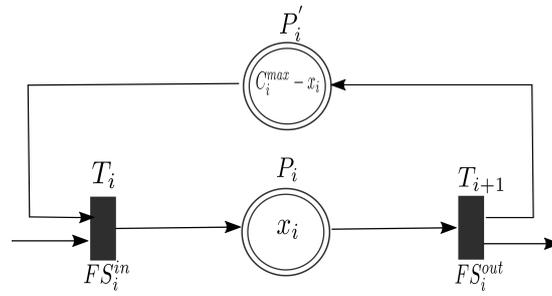


FIGURE 3.3 – Modélisation d'un tronçon par RdPCC.

mathématiques des débits instantanés d'entrées et de sorties sont données comme suit :

$$f s_i^{in}(t) = \begin{cases} FS_i^{in} & \text{if } C_i^{max} - x_i > 0 \\ \min(FS_i^{in}, FS_i^{out}) & \text{if } C_i - x_i = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$f s_i^{out}(t) = \begin{cases} FS_i^{out} & \text{if } x_i > 0 \\ \min(FS_i^{out}, FS_i^{in}) & \text{if } x_i = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Lorsque l'entrée et la sortie de C-transition est valide, l'évolution de marquage  $x_i$  de C-place qui décrit la dynamique de la file d'attente est représentée par l'équation suivante :

$$\dot{x}_i(t) = f s_i^{in}(t) - f s_i^{out}(t) \quad (3.12)$$

En revanche, si  $T_i$  est validée (i.e. arrivée de véhicules) et  $T_{i+1}$  est non validée (i.e. la sortie de véhicules est non autorisée  $FS_i^{out} = 0$ ), une file d'attente se forme. L'évolution instantanée de cette file d'attente est exprimée par l'équation suivante :

$$\dot{x}_i(t) = f s_i^{in}(t) \quad (3.13)$$

### 3.3.1.2 Modèle RdP T-temporisé de feu de signalisation

Chaque feu de signalisation du intersection possède trois états (feux tricolores) : vert, orange et rouge. Par souci de simplicité, on suppose que la durée de signalisation de l'orange est ajoutée à celle du rouge, et seuls subsistent deux états : « vert » et « rouge ». Il en résulte que les phénomènes de ralentissement de véhicules ne sont pas pris en compte. La modélisation du cycle des états du feu, qui est vert, puis rouge, puis vert, ... etc, est réalisée par un RdP T-temporisé (figure 3.4). Les places  $P_1$  et  $P_2$  représentent respectivement l'état du feu de signalisation. La présence d'un jeton dans la place  $P_1$  par exemple indique que le feu est

actif. Le feu vert reste affiché sur la tronçon pendant une phase de feux de durée  $t\phi_i$  associée à la transition  $T_i$ . Le franchissement de cette transition s'établit lorsque la durée  $t\phi_i$  est écoulée (commutation du feu au rouge).

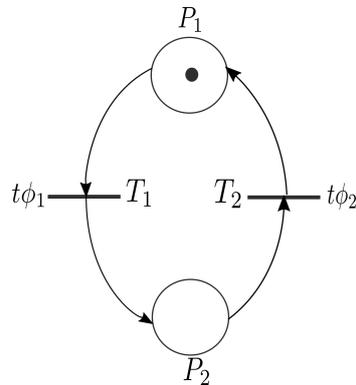


FIGURE 3.4 – Modèle RdP T-temporisé de feu de signalisation.

### 3.3.1.3 Modèle RdPH d'un tronçon

Le modèle RdPCC présenté précédemment est bien adapté pour modéliser l'écoulement continu du trafic sur un tronçon dans une intersection à feux. Toutefois, dans une intersection à feux, la circulation de véhicules est inhérente aux changements des états des feux. Dans un cycle de feu, l'évolution du trafic sur une tronçon est caractérisée par un comportement de passage pendant le vert et un comportement d'attente pendant le rouge (i.e., formation d'une file d'attente du fait de l'interdiction de passage de véhicules). Cette dynamique peut être modélisée par un RdPH composé par le RdPCC de la figure 3.3 et le RdP T-temporisé de la figure 3.4.

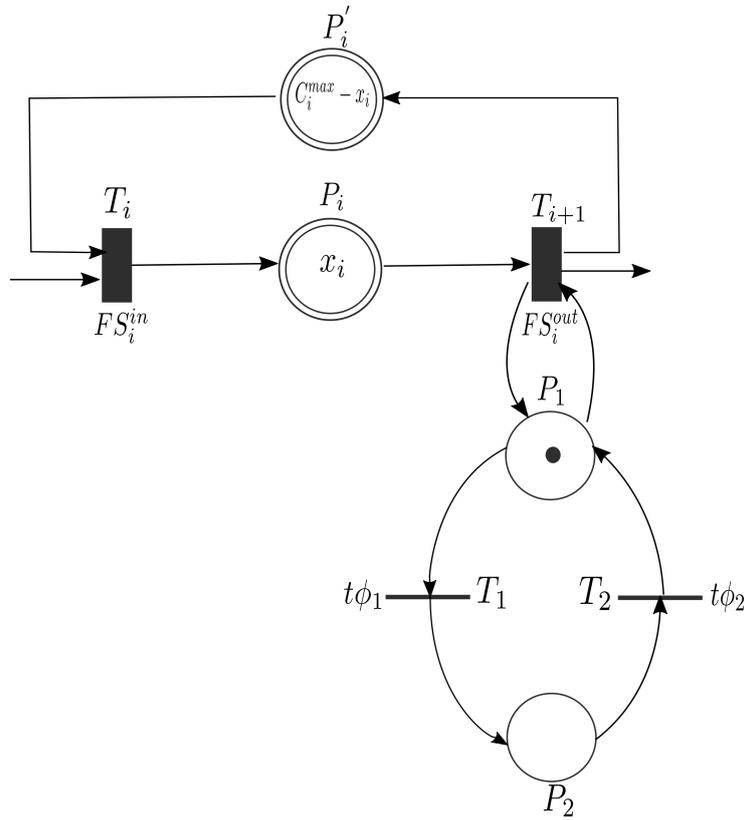


FIGURE 3.5 – Modèle RdPH d'un tronçon

### 3.3.2 Modélisation de deux intersections adjacentes

Dans cette section, En se basant sur l'approche de modélisation présentée précédemment dans la figure 3.5, nous allons présenter le modèle RdPH D-élémentaires d'un réseau de trafic à deux intersections adjacentes. Tout d'abord nous rappelons la définition d'une sous classe de RdPH et puis nous représentons le modèle RdPH D-élémentaires du trafic.

#### 3.3.2.1 Les réseaux de Pétri hybrides D-élémentaires

Les RdPH D-élémentaires ont été introduits dans [Ghomri.L et al. 2005]. Ce formalisme est la combinaison d'un RdP continu et d'un RdP T-temporisé. Le fait que la partie discrète est représentée par un RdP T-temporisé confère au modèle hybride un comportement non-déterministe. Rappelons que, pour un RdP T-temporisé, les dates de franchissement des transitions ne sont pas déterministes mais prises dans des intervalles de franchissement. De plus, dans un RdPH D-élémentaire la partie discrète évolue de manière indépendante par rapport à la partie continue qu'elle contrôle.

**Définition 2.2** (RdP hybride D-élémentaire) : Un RdP hybride D-élémentaire est une structure  $RdPHD = (P, T, h, \Delta, \Sigma, Pre, Post, U, FS, I, m_0)$ . Les définitions des paramètres  $P, T, h, \Delta, \Sigma, FS, I, m_0$ , sont identiques à celles du RdP hybride et :

- *Pre* et *Post* sont les applications d'incidence avant et arrière. Ces applications sont telles que :

$$\forall (P,T) \in P^C \times T^D, Pre(P,T) = Post(P,T) = 0 \quad (3.14)$$

$$\forall (P,T) \in P^D \times T^C, Pre(P,T) = Post(P,T) \quad (3.15)$$

- $U : T^D \rightarrow \mathfrak{R}^+ \times (\mathfrak{R}^+ \cup \{\infty\})$  associe à chaque D-transition  $T_j$  son intervalle de franchissement  $[\alpha_j, \beta_j]$ .

Les conditions 3.14 et 3.15 sur les applications d'incidence avant et arrière signifient qu'aucun arc ne relie une place continue à une transition discrète. Et si un arc relie une place discrète  $P_i$  à une transition continue  $T_j$ , l'arc connectant  $T_j$  à  $P_i$  doit exister. Ceci apparaît graphiquement comme des boucles connectant des places discrètes à des transitions continues. Physiquement ceci signifie que le RdP discret évolue indépendamment du RdP continu, mais contrôle l'évolution de ce dernier.

### 3.3.2.2 Description de deux intersections adjacentes

Nous considérons l'exemple de deux intersections adjacentes de la figure 3.6 qui présente un élément de base d'un réseau artériel(RA). Chaque intersection est composée de  $l_{ij}$  ou  $i \in \{1, \dots, N\}$  représente le nombre d'intersections et  $j \in \{1, \dots, 4\}$  représente le nombre de tronçons. En général, la majorité des flux de trafic écoule le long de la rue principale, dans cette études, nous considérons tous les mouvements de flux de trafic. Chaque tronçon  $l_{ij}$  est caractérisé par des flux instantanés d'entrée et de sortie respectivement définis par  $fs_{ij}^{in}(t)$ ,  $fs_{ij}^{out}(t)$  et des flux d'entrée et de sortie maximaux donné respectivement  $FS_{ij}^{in}$ ,  $FS_{ij}^{out}$  et une capacité maximale donnée par  $C_{ij}^{max}$ . De plus  $x_{ij}$  désigne la file attente [veh]. Notons que ce réseau de trafic est équipé des capteurs vidéo mis à disposition à tout moment, la mesure des données relatives au trafic tels que : la longueur de la file d'attente, le débit l'entrée et de sortie... etc.

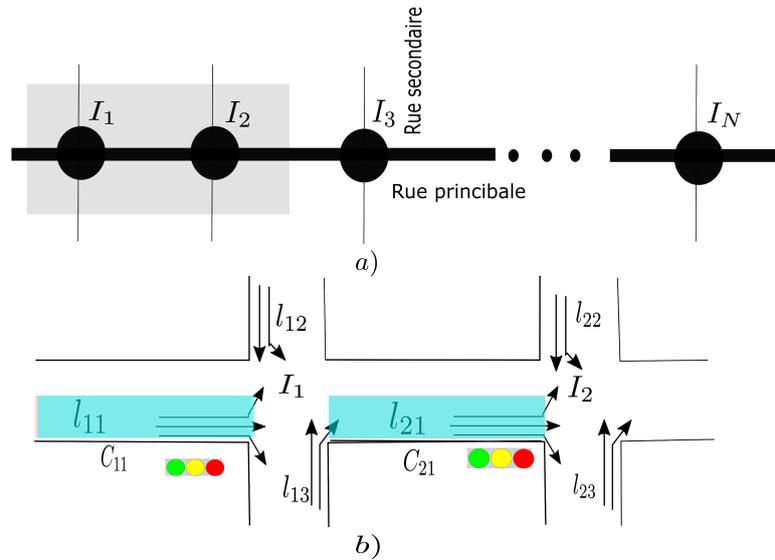


FIGURE 3.6 – (a) Réseau artériel. (b) Deux intersections adjacentes.

### 3.3.2.3 Modèle de RdPH D-élémentaire pour deux intersections adjacentes

Dans un réseau de trafic, l'écoulement des véhicules est considéré comme une variable continue basée sur le principe de continuité présenté précédemment, il est interrompu par les feux de signalisations correspondant à la dynamique d'un système discret. Il s'agit donc d'un système dynamique hybride (SDH). Il convient d'exploiter le modèle RdPCC pour décrire l'écoulement des véhicules qui s'écoule le long des tronçons du réseau de trafic ainsi que le modèle RdP T-temporisé présenté dans la figure 3.4 pour modéliser la coordination des feux de signalisation des deux intersections adjacentes. La combinaison de ces deux modèles fournit un modèle RdP hybride D-élémentaire (RdPHD) des deux intersections adjacentes en s'appuyant sur le modèle d'une intersection (figure 3.5).

La coordination des feux de signalisation dans deux intersections adjacentes est illustrée dans la figure 3.7 via le diagramme distance-temps d'un plan de synchronisation des feux. Il y a trois paramètres clés qui présentent la coordination des feux : la longueur de cycle  $tc$ , le temps de décalage entre les deux intersections adjacentes  $to$  et les temps de feu vert  $tgi$ . Une combinaison entre les feux de deux intersections donne quatre états ( $t\phi_p$ ), où  $p = 4$  est le nombre des phases. Chaque phase définit les états de feux : ( $t\phi_1$  : Vert-Rouge,  $t\phi_2$  : Vert-Vert,  $t\phi_3$  : Rouge-Vert,  $t\phi_4$  : Rouge-Rouge).

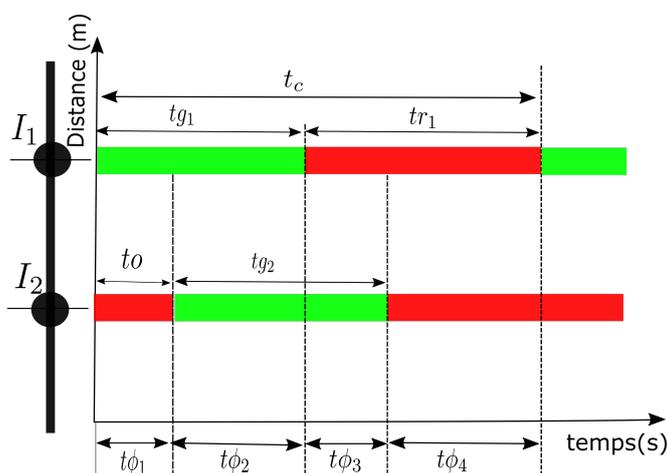


FIGURE 3.7 – Diagramme distance-temps de la coordination des feux.

Le modèle RdP T-temporisé de la coordination de feux de signalisation est présenté dans la figure suivante :

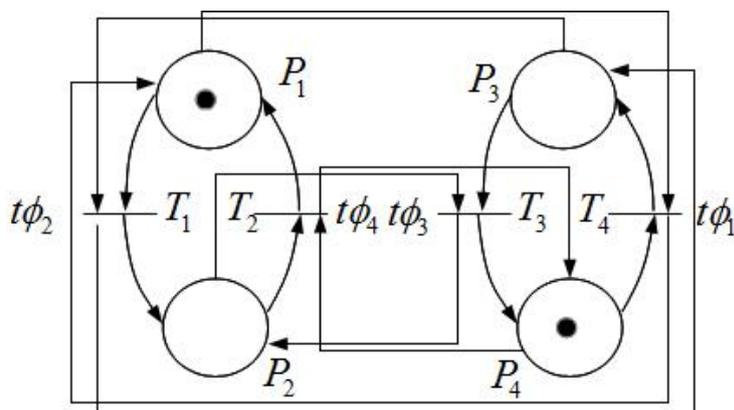


FIGURE 3.8 – Modèle RdP T-temporisé de la coordination des feux.

La configuration de ce modèle nous permettra de respecter l'ordre de phases et la coordination des feux. Les intervalles de franchissement de transitions discrètes sont représentées par le temps de phases de commutation ( $t_{\phi_p}$ ). Les transitions et les durées phases actives exprimées par les paramètres clés des feux de signalisation sont donnés dans tableau 3.1.

TABLEAU 3.1 – Les phases de feux actives durant un cycle de temps.

Phase	Transitions active	Durées
1	$T_4$	$t\phi_1 = t_0$
2	$T_1$	$t\phi_2 = t g_1 - t_0$
3	$T_3$	$t\phi_3 = t g_2 - (t g_1 - t_0)$
4	$T_2$	$t\phi_4 = t c - (t g_1 + t_0)$

D'autre part, nous présentons dans la figure 3.10, le modèle RdPCC permettant de modéliser l'écoulement de flux du trafic sur les deux tronçons principales  $l_{11}$  et  $l_{21}$  dans les deux intersections adjacentes présentées dans la figure 3.9.

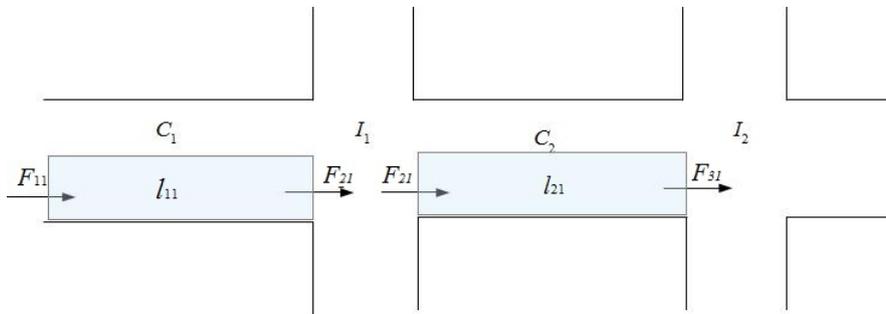


FIGURE 3.9 – Représentation schématique des tronçons principales  $l_{11}$  et  $l_{21}$  dans les deux intersections adjacentes.

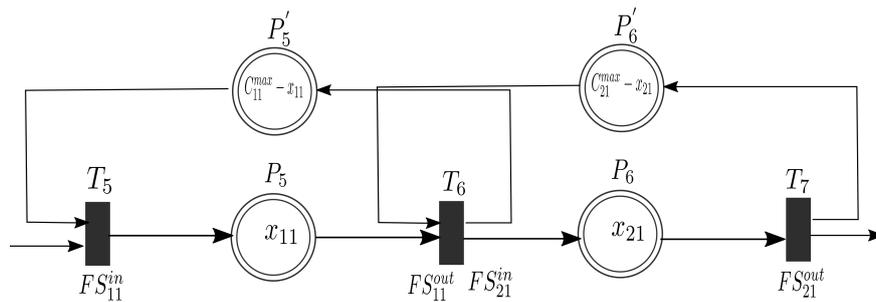


FIGURE 3.10 – Modèle RdPCC correspondant à deux intersections adjacentes.

Dans ce modèle, les transitions continues peuvent être soit :

- fortement validées, si toutes ses places d'entrée sont marquées ;
- faiblement validées, si toutes ses places d'entrée qui sont vides sont alimentées par le franchissement des autres transitions ;
- Non validées, si certains de ses place d'entrée ne sont ni marqués ni alimentés par des franchissements d'autres transitions ;

Les vitesses de franchissements instantanées  $f_{sj}$  des transitions  $T_j$  sont égales à des vitesses maximales des franchissement  $FS_j$  si les transitions sont fortement validées. Pour plus de détail sur le calcul de ces vitesses, le lecteur peut référer à [David, R. & Alla, H., 2010].

Afin d'élaborer le modèle RdH D-élémentaire des deux intersections adjacentes, on procède à un couplage du modèle RdPCC de la figure 3.10 modélisé l'écoulement des flux des véhicules dans les deux intersections adjacentes et le RdP T-temporisé de la figure 3.8 traduisant le comportement du plan de la coordination des feux de signalisation.

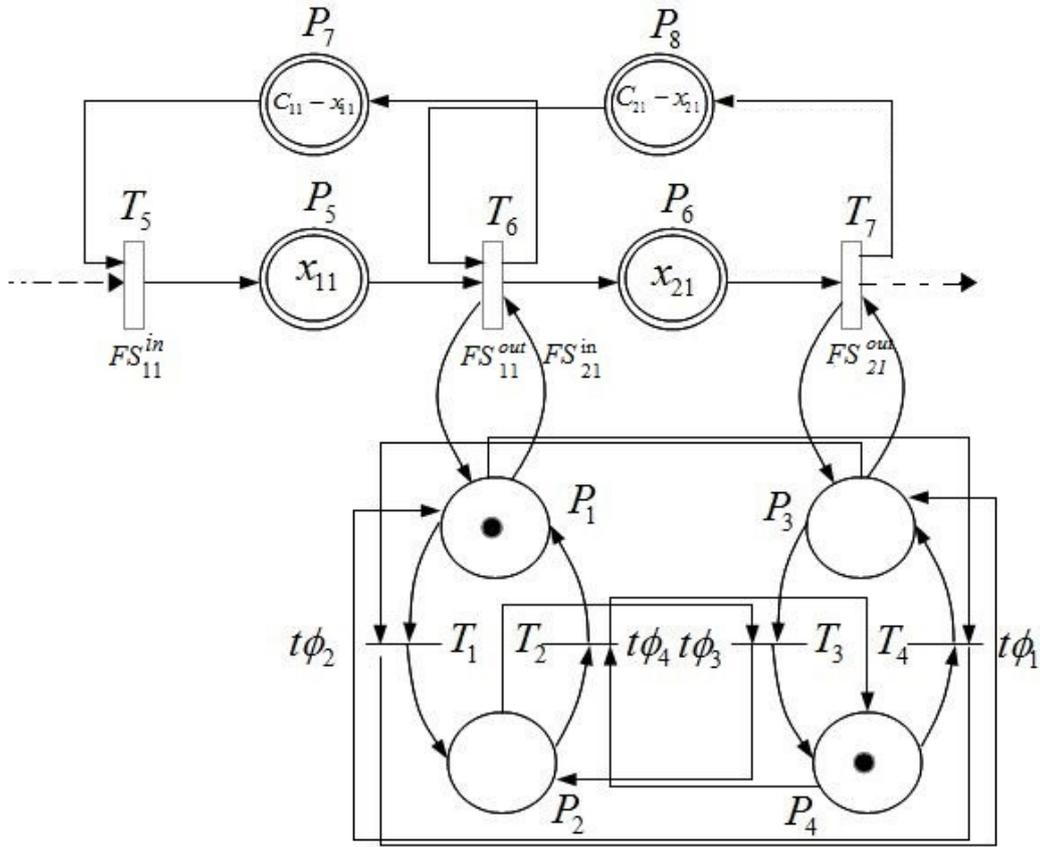


FIGURE 3.11 – RdPH D-élémentaire modélisant deux intersections adjacentes.

Pendant un cycle de feu  $tc$ , l'écoulement du trafic dans les deux intersections adjacentes est régi par les équations suivantes :

$$l_{ij} : \begin{cases} \dot{x}_{ij} = f_{ij}^{in} - f_{ij}^{out}, & \text{si le feu vert est activé,} \\ \dot{x}_{ij} = f_{ij}^{in}, & \text{si le feu vert est désactivé,} \end{cases} \quad (3.16)$$

Les flux actifs à chaque phase sont présentés dans le tableau suivant :

La limitation pratique du modèle proposé est liée à l'analyse et à la vérification. Le couplage fort entre les deux type de RdP rend difficile l'analyse du modèle hybride [Ghomri, L., 2007]. Sa traduction en automate hybride permet de combiner la puissance de modélisation

TABLEAU 3.2 – Flux de trafic de chaque phase.

Phase	flux actif	Durée
1 <sup>st</sup>	$F_{11}^{in}, F_{(21)j}^{in}$ et $F_{ij}^{out}$	$t\phi_1$
2 <sup>nd</sup>	$F_{11}^{in}, F_{11}^{out}, F_{(21)j}^{in}$ et $F_{(21)j}^{out}$	$t\phi_2$
3 <sup>rd</sup>	$F_{11}^{in}$ et $F_{21}^{out}$	$t\phi_3$
4 <sup>th</sup>	$F_{11}^{in}$	$t\phi_4$

des RdPH à la puissance d'analyse des automates hybrides, d'où la nécessité d'introduire l'AH.

## 3.4 Élaboration d'un nouveau modèle d'un réseau de trafic urbain

Les RdPH ont connu depuis leur invention un réel succès en raison de leur simplicité mathématique, des avantages que procurent leurs représentations graphiques. Les automates hybrides constituent un outil puissant d'analyse. Dans la littérature, nous pouvons constater plusieurs travaux concernant la transformation des réseaux de Pétri en automates en allant des RdP ordinaires aux graphes de marquages; RdP temporels aux automates temporisés [ Sava, A. 2001] et [ Cassez, F. & Roux, O. 2004], ainsi que des RdP hybrides aux automates hybrides [Allam, H & Alla,H., 1998] [Ghomri, L. & al., 2005] [Ghomri, L & Alla, H., 2007] [Mottallebi, H., et al. 2014].

Dans le même objectif d'analyse et de synthèse de la commande, un modèle combiné de deux intersections adjacentes a été proposé, la suite de ce chapitre, afin de bénéficier des avantages de RdPH D-élémentaire et d'automate hybride rectangulaire (AHR) et d'éviter leurs inconvénients. Avant l'introduire notre modèle, nous rappelons la définition de l'automate hybride rectangulaire, ensuite nous appliquons la translation structurelle au modèle RdPH D-élémentaire proposée précédemment pour l'obtention d'un modèle AHR.

### 3.4.1 Les Automates Hybrides Rectangulaires

**Définition 3.4.** Un Automate Hybride Rectangulaire est un 7-uplet défini par :

$RHA=(S, Var, Con, Lab, Edge, Flux, Inv)$

2.  $Var$  : est un vecteur d'état comportant  $n$  variable réelles;
3.  $Con$  : est une fonction assigne un ensemble des variables contrôlées pour chaque sommets;
4.  $Lab$  : est un ensemble fini d'événements;
5.  $Edege \subseteq Loc \times Lab \times (\mathbb{R}^d \times \mathbb{R}^d \times 2 \times 2^{1,\dots,n}) \times s$  est un ensemble fini de transitions, chaque transition est un quintuple  $T = (s, e, G, init, s')$  tels que :
  - $s$  est le sommet source;
  - $e$  est un événement associe à la transition;
  - $G$  est la garde de la transition  $t_i$ , c'est un prédicat sur  $X$ ; la transition  $t_i$  ne peut être franchie que si sa garde  $G$  est vérifiée;

- *init* est la fonction de réinitialisation qui affecte une expression aux variables continues quand la transition  $t_i$  est franchie.
  - $s'$  est le sommet but;
6.  $Flux : S \rightarrow Rect(X \cup \dot{t} = 1)$  est la fonction qui affecte à chaque sommet une représentation pour l'évolution continue. Durant le séjour dans un sommet  $s$  de l'automate, l'évolution des variables continues est exprimée généralement sous la forme d'une équation d'état  $flux(s)$ ,
7.  $Inv : S \rightarrow \mathfrak{R}^D$  est une fonction qui associe à chaque sommet  $s$ , un prédicat  $Inv(s)$ , qui doit être vérifié par les valeurs des variables continues lors du séjour de l'automate dans le sommet.

### 3.4.2 Principe de traduction des RdPH D-élémentaires en AHR

En se référant au travail de [Ghomri et al, 2005], nous présentons une procédure permettant le passage du RdPH D-élémentaire en AHR. Comme déjà illustré dans le modèle RdPH D-élémentaire (figure 3.11), la partie discrète a un comportement indépendant de la partie continue; Son évolution ne dépend que de son marquage initial et de la variable continue indépendante qui est le temps. Pour chaque marquage accessible par le RdP T-temporisé, correspondra une configuration du RdPCC. Le modèle RdPH D-élémentaire peut donc être étudié d'une manière hiérarchique, d'abord la partie discrète est considérée, ensuite, pour chaque marquage accessible de cette dernière, la configuration continue. L'algorithme de traduction de RdPH D-élémentaires en automate hybride, que nous proposons dans le cadre de cette thèse, comporte trois étapes :

#### 1. Isoler la partie RdP T-temporisé du modèle hybride et construire son automate temporisé équivalent

Dans le modèle hybride, les parties discrète et continue sont reliées via des boucles (deux arcs de même poids dans les deux sens) connectant les D-places ( $P_1$  et  $P_3$  à des C-transitions ( $T_6$  et  $T_7$ . Ces boucles constituent les limites entre le RdP T-temporisé et le RdPCC. En brisant ces liens, on aura les deux parties discrètes et continue. Cette première étape de l'algorithme de traduction consiste à traduire le RdP T-temporisé en automate temporisé permettant ainsi une nouvelle visibilité de la dynamique discrète correspondant aux 4 phases de la coordination des feux. La trajectoire discrète minimale est décrite par la séquence des modes  $S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_1$ .

La figure 3.12 et la figure 3.13 illustre respectivement la partie discrète du modèle RdPH D-élémentaire et le modèle équivalent en Automate temporisé

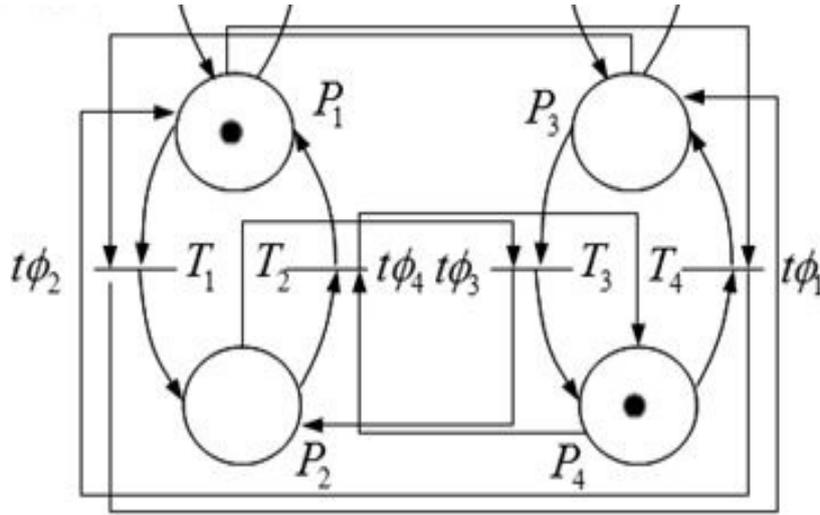


FIGURE 3.12 – La partie discrète de modèle RdPH D-élémentaire.

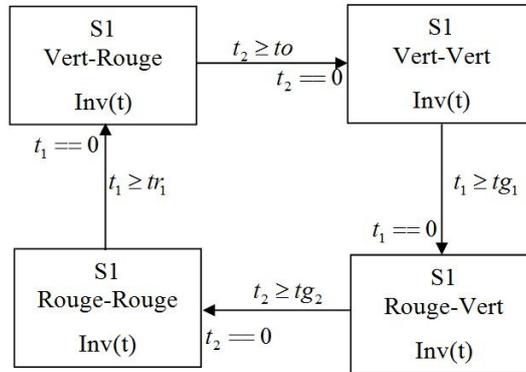
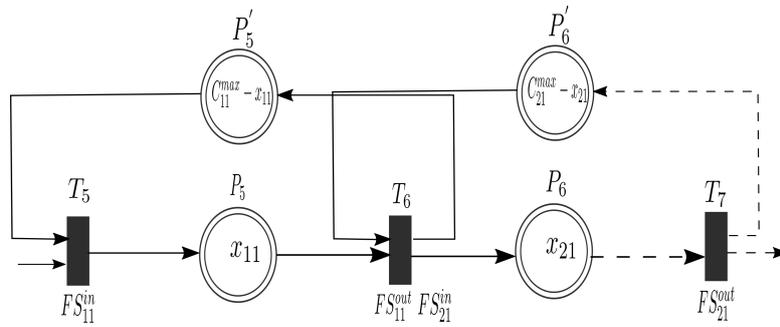


FIGURE 3.13 – Automate temporisé équivalent à la partie discrète.

## 2. Construire l'automate hybride correspondant à chaque sommet de l'automate temporisé

Le but de cette étape est de construire les automates hybrides modélisant les configurations des RdPCC correspondant à chaque macro-sommet. Ce dernier désigne les sommets ( $S_1, S_2, S_3$  et  $S_4$ ) de l'automate temporisé de la figure 3.13. L'évolution d'un RdPCC est généralement modélisée par son graphe d'évolution, assimilable à un automate hybride linéaire dans lequel les variables d'état de l'automate correspondent au marquage des C-places et les transitions modélisent l'événement (équivalent au marquage d'une C-place nul).

Dans cette étape, nous étudions pour chaque état discret de la figure 3.13, la configuration de la partie continue du modèle RdPH D-élémentaire puis nous interprétons son évolution en un macro-sommet d'un AH ceci fournit une image réduite du comportement général. Aussi le basculement entre les différents états discrets produira une série des sommets qui sera associé sous forme hiérarchique d'automate hybride tel que schématisé sur la figure 3.16


 FIGURE 3.14 – RdPCC correspondant au marquage discret  $[1001]^T$ .

La figure 3.14 représente la configuration de la partie continue correspondante au marquage  $[1001]^T$  figure 3.12, avec les quatre C-places, seules les deux C-places ( $P_5$  et  $P_6$ ) interviennent dans l'évolution d'écoulements des véhicules, elle est donc modélisée par un automate hybride avec trois sommets (Figure 3.15).

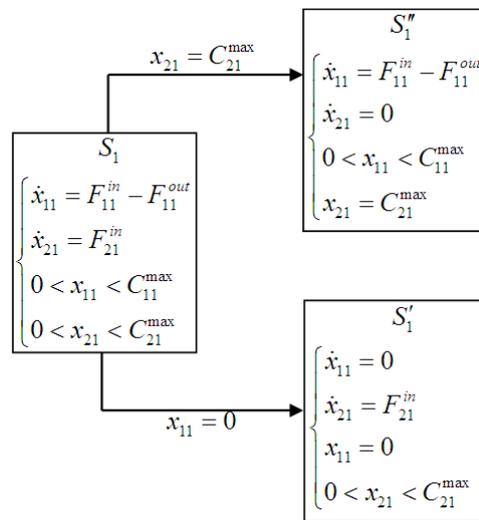


FIGURE 3.15 – Automates hybrides modélisant les comportements des RdPCC présenté dans (figure 3.14).

### 3. Remplacer les transitions entre les macro-sommets par des transitions entre les sommets internes

Dans cette dernière étape, nous remplaçons les transitions entre les macro-sommets dans l'automate hiérarchique par des transitions entre leurs sommets internes à condition que le vecteur caractéristique du sommet source soit inférieur ou égal (composante à composante) au vecteur caractéristique du sommet but. Ceci signifie que franchir une transition discrète dans un RdPH D-élémentaire, peut marquer une place vide, mais ne peut pas annuler le marquage d'une place marquée [Ghomri, L., 2007].

La figure 3.17 illustre l'automate hybride rectangulaire (AHR) résultant de l'application de l'algorithme de traduction au RdPH D-élémentaire de la figure 3.11.

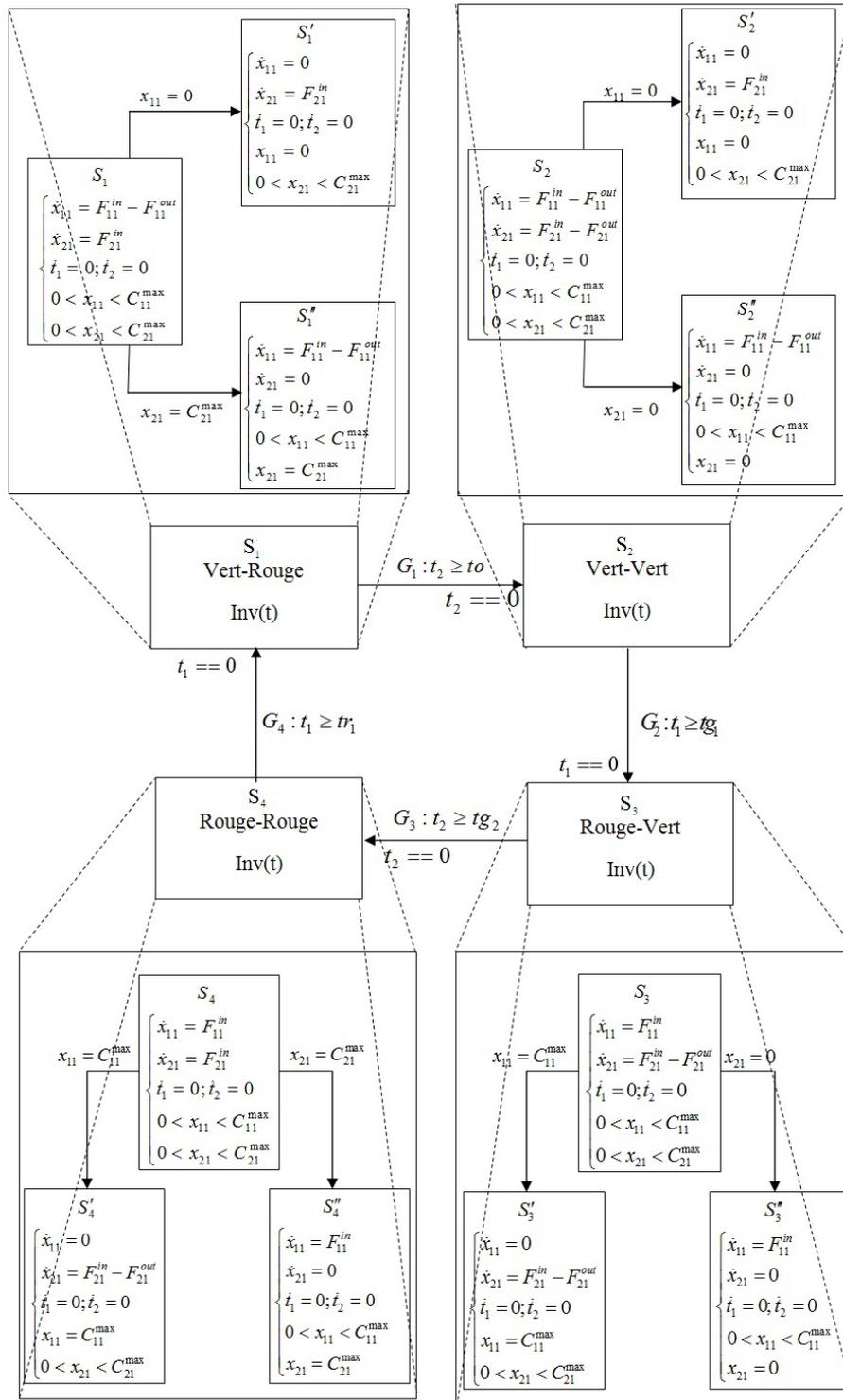


FIGURE 3.16 – Forme hiérarchique de l'automate hybride suite à l'application la deuxième étape de l'algorithme.

### 3.4.3 Caractéristiques du modèle résultant de la traduction

L'évolution des différentes dynamiques de l'écoulement des véhicules des deux intersections adjacentes dans les différentes conditions du trafic est représentée par l'automate

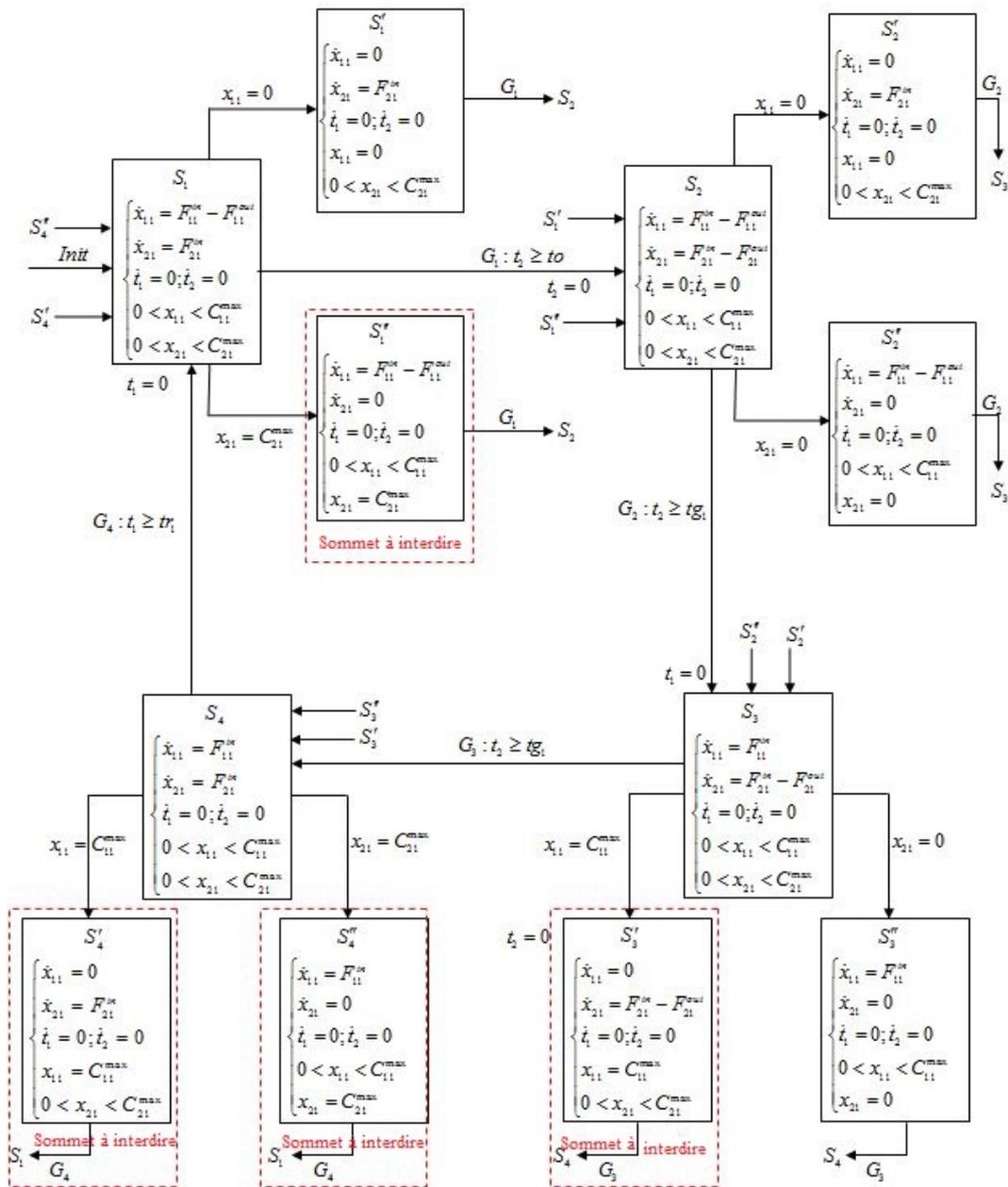


FIGURE 3.17 – Modèle d’AHR pour deux intersections adjacentes

hybride rectangulaire ( figure 3.17). L’AHR obtenu est constitué de douze sommets caractérisant les différents modes de fonctionnement du trafic. Les sommets  $S_1, S_2, S_3$  et  $S_4$  décrivent l’état fluide du trafic ou aucun phénomène de sursaturation ne se produit c’est-à-dire la longueur de file d’attente dans chaque tronçon évolue entre 0 véhicule et leur capacité maximale  $C_i^{max}$  comme indiqué par l’invariant  $0 \leq x_{ij} < C_i^{max}$ . Les sommets interdits  $S_1', S_3', S_4'$  et  $S_4''$  illustrent l’état de saturation ou les phénomènes de Spillback et de file d’attente résiduelle apparaissent comme l’indique l’invariant ( $x_{ij} \geq C_{ij}^{max}$ ).

L’algorithme de traduction des RdPH D-élémentaires en automates hybrides donne lieu à un automate hybride rectangulaire avec un certain nombre de spécificités :

1. Les variables d'état continues sont de deux types :
  - Les horloges  $t_i$  : elles correspondent aux durées de feux de signalisation de chaque intersection  $i$  ;
  - Les variables  $x_{ij}$  : elles correspondent aux files d'attentes dans chaque tronçon  $l_{ij}$  ;
2. Les horloges peuvent être réinitialisées lors de franchissement de transitions, tandis que les variables réelles  $x_{ij}$  ne le sont jamais, elles n'effectuent donc jamais de sauts.
3. Une garde de transition ne dépend que d'une seule variable réelle. Elle peut être sous une des deux formes suivantes :
  - $x_{ij} = 0$  si la file d'attente dans le tronçon égale à zéro. Par exemple la transition d'un sommet est franchissable à tout moment lorsque la longueur de la file d'attente du tronçon atteint la valeur 0 véhicules.
  - $t_{imin} \leq t_i \leq t_{imax}$  si la durée de feux atteint sa valeur limite.

### 3.5 Analyse de modèle résultant du trafic

Le modèle obtenu constitue une sur-approximation du modèle exact dans la mesure où il présente toutes les dysfonctionnement, certains de ces modes correspondant aux sommets ne sont jamais accessibles et sont moins atteignables lors du fonctionnement normal du système. Par conséquent une analyse d'atteignabilité sera nécessaire pour éliminer les sommets non atteignables et les transitions associées.

#### 3.5.1 Analyse d'atteignabilité

L'analyse d'atteignabilité constitue un point primordial dans la vérification des propriétés des systèmes dynamiques hybrides modélisés par des automates hybrides. Cette analyse est généralement basée sur le calcul d'un ensemble d'états accessibles à partir d'un ensemble d'états donné. En effet, on cherche à vérifier si une région de l'espace d'état est accessible à partir d'une région initiale donnée.

La procédure d'analyse d'atteignabilité a été implémentée dans les logiciels dédiés à la vérification des systèmes temporisés et hybrides. Parmi ces logiciels, on peut citer Hytech (Henzinger, H. et al. 1997) et PHAVer (Frehse, G., 2005 ; Asarin et al., 2006).

Dans notre travail, nous utilisons le logiciel PHAver. Celui-ci prévoit une syntaxe particulière pour décrire textuellement un automate hybride rectangulaire. Il fournit des commandes pour le calcul des ensembles d'états atteignables et des relations de simulation ainsi que des commandes pour la manipulation et l'affichage de la structure de données. Son langage est aussi convivial que possible. Une annexe (A.1) sur le logiciel PHAver et l'implémentation du modèle proposé est consacrée à la fin de cette thèse.

Cette méthode d'analyse se fonde sur la détermination formelle des espaces d'état atteignables par l'automate hybride rectangulaire. Cette détermination est basée sur l'application d'une analyse en avant (réalisée en utilisant le logiciel PHAver) de modèle obtenu. Suite à cela, un automate atteignable est construit ou chaque sommet est caractérisé par un jeu d'inégalités unique qui sera montré dans l'exemple suivant 3.21.

### 3.5.2 Exemple d'application

Dans la suite nous considérons un exemple des données réelles de la circulation dans deux intersections adjacentes dans des conditions de sursaturations afin de validé, de manière intuitive, notre approche de modélisation et d'analyse .

Les paramètres des deux intersections adjacentes sont : la longueur des tronçons :  $l_{11}$  et  $l_{21}$  est égal à (150 m); la vitesse libre est 48.3 km/h (30 mph). Le débit de sortie  $f_{11}^{out}$  est 1800 [veh/h], le débit d'entrée  $FS_{11}^{in} = 1080$  [veh/h] et  $FS_{21}^{in} = 1800$  [veh/h], la capacité de chaque tronçon est  $C_1^{max} = C_2^{max} = 30$  veh. Les feux de signalisation sont définies comme suit : la longueur de cycle est  $tc=40$  s, temps de vert  $tg_1=20$  s et  $tg_2=20$  s, temps de décalage  $to=5$  s.

Le modèle RdPH D -élémentaire correspondant est illustré par la figure suivante :

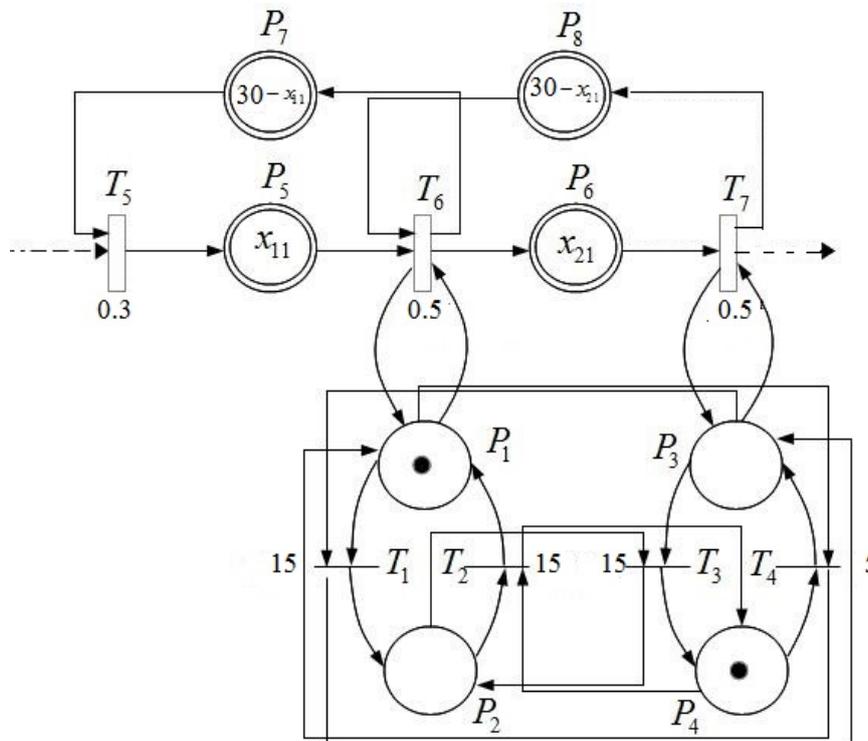


FIGURE 3.18 – Modèle RdPH D-élémentaire de l'exemple

En appliquant l'algorithme de traduction au modèle RdPH D-élémentaire de la figure 3.18 on obtient le modèle combiné en AHR présenté dans la figure 3.19 :

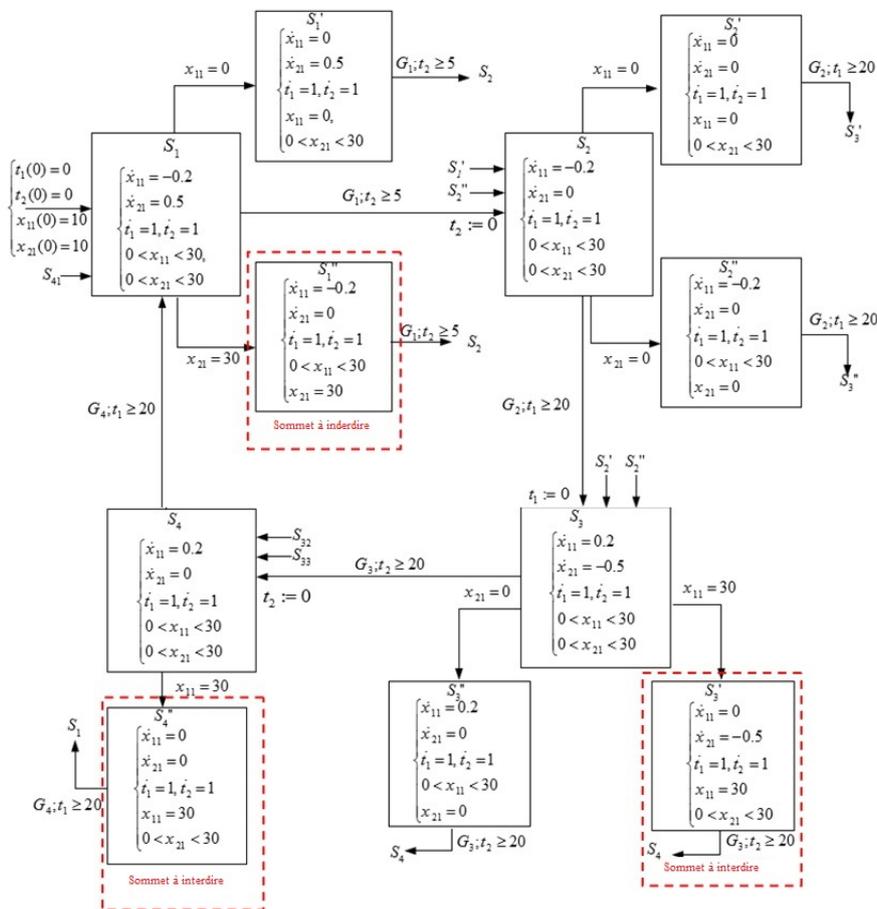


FIGURE 3.19 – Modèle AHR

Après avoir réalisé le modèle du trafic, nous procédons à l'analyse en boucle ouverte; une analyse d'atteignabilité est réalisée afin d'évaluer l'état du système de trafic c'est-à-dire si l'état de congestion illustré par des sommets interdits sera atteint ou non. L'analyse en avant du modèle présenté dans la figure 3.19 conduit à un automate atteignable schématisé par la figure suivante :

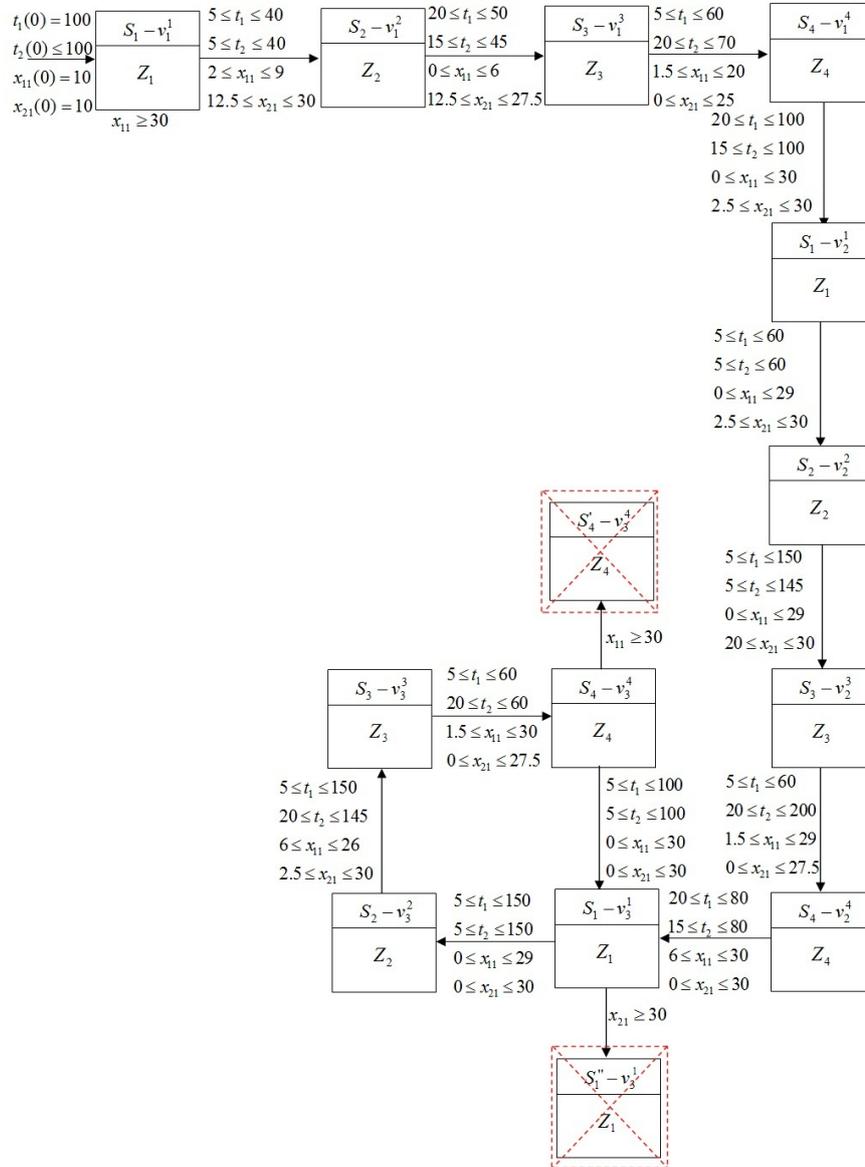


FIGURE 3.20 – Modèle d'automate atteignable

Nous présentons ici la forme dans laquelle le logiciel PHAVer calcule l'espace d'état atteignable dans chaque sommet :

$$\begin{array}{c}
 \boxed{S_4 - \nu_2^4} \\
 Z_4 = \begin{cases} 10x_{11} + 4x_{21} - 3t_1 \leq 360 \\ 10x_{11} - 5x_{21} - 2t_2 \leq 250 \\ 10x_{11} - 3t_1 \leq 260 \\ 2x_{21} + t_1 - t_2 \leq 60 \\ -2x_{21} - t_1 + t_2 \leq -5 \\ 10x_{11} + 3t_1 \leq 0 \\ -t_1 + t_2 \leq 0 \\ t_2 \geq 0 \\ x_{11} < 30, x_{21} \geq 0 \end{cases} \\
 \xrightarrow{\Psi^4 = \begin{cases} 20 \leq t_1 \leq 80 \\ 20 \leq t_2 \leq 80 \\ 6 \leq x_{11} \leq 24 \\ 0 \leq x_{21} \leq 30 \end{cases}}
 \end{array}$$

FIGURE 3.21 – Exemple d'un sommet de l'automate atteignable de la figure 3.20

- $S_4$  : est un sommet accessible (atteignable) d'ordre 4 ;
- $\nu_2^4$  : caractérise le nombre de visite pour un sommet accessible, 2 est le nombre de visite pour le sommet 4 ;
- $Z_4$  est l'espace d'état défini par un ensemble d'inégalités exprimant des contraintes linéaires.
- $\Psi^4$  est une garde de transition qui exprime les intervalles convexes donnés par l'espace des états  $Z_4$

L'automate atteignable présenté dans la figure 3.20 fournit une description claire de la dynamique de flux de circulation dans deux intersections successives. Cet automate est constitué de quatorze sommets dont huit sommets représente le comportement transitoire et le reste représente le régime permanent décrivant la dynamique du trafic.

Dans notre étude, nous nous intéressons à l'évolution du trafic en régime permanent caractérisée par la dynamique de  $x_{11}(t)$  et  $x_{21}(t)$ ; le système commence à partir des conditions initiales et du sommet ( $S_1$ ) correspond à la phase 1 ; dans lequel deux comportements opposés sont constatés;  $x_{11}(t)$  diminue et  $x_{21}(t)$  augmente jusqu'à ce que le nombre du véhicule dépasse la capacité limite du tronçon  $l_{21}$  exprimée par la garde ( $x_{21} \geq 30$ ) ou le sommet  $S_1''$  est atteignable, ce qui signifie l'apparition de sursaturation dans le tronçon  $l_{21}$  et conduit à un état de blocage général du tronçon en amont de  $l_{11}$  c'est-à-dire l'apparition du phénomène de Spillback.

Alors que dans le sommet 2 ou se produit la phase 2,  $x_{11}(t)$  et  $x_{21}(t)$  diminuent sans être nulles. Ensuite, dans le sommet ( $S_3$ ) de la phase 3, seulement la dynamique de variable  $x_{11}(t)$  croît. Dans la dernière phase, le variable  $x_{11}(t)$  continue à croître, le sommet  $S_4'$  est atteint, ce qui signifie que la longueur de la file d'attente dépasse la capacité du tronçon  $l_{11}$ .

## 3.6 Conclusion

L'étude en modélisation menée dans le chapitre 3, nous a permis de rapprocher le comportement du trafic dans une zone urbaine à un SDH. Dans un premier temps, nous cherchons un modèle en RdPH. Malgré la puissance de modélisation, l'analyse de la propriété du système reste très limitée. Le passage du modèle RdPH en AH s'avère utile. L'intérêt de cette traduction est de bénéficier les avantages des deux modèles en associant la puissance de modélisation des RdPH avec les capacités d'analyse de AH. Un algorithme de traduction structurelle des RdPH D-élémentaire à un automate hybride est présenté. Sa structure favorable sera exploitée pour la synthèse du contrôleur. Le modèle de trafic peut reproduire l'aspect important de la dynamique des flux du trafic où les conditions de circulation saturés conduit à des phénomènes de congestion tels que (Spillback et queue résiduelle ) sont présentés par des sommets interdits. Une analyse d'atteignabilité est effectuée dans le but de vérifier ce modèle en boucle ouverte. Pour réduire les phénomènes de congestion dans un réseau de trafic urbain, une stratégie de commande optimale est développée dans le chapitre suivant.

# Chapitre 4

## Stratégie de commande du trafic

*« La connaissance s'acquiert par  
l'expérience, tout le reste n'est que de  
l'information. »*

---

Albert Einstein

## 4.1 Introduction

Nous venons, de développer dans le chapitre précédent un nouveau modèle de trafic en se basant sur le concept des RdPH et AHR. Ce modèle obtenu représente le comportement des flux véhicules sur deux intersections adjacentes, en tenant compte les différents phénomènes de congestion et de sursaturation tels que la file d'attente résiduelle et le spillback. Ces phénomènes sont présentés dans le modèle par des sommets interdits.

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une stratégie de commande optimale via le modèle développé précédemment. Un automate hybride rectangulaire contraint (AHRC) est construit par l'ajout des spécifications de commande exprimées par des contraintes linéaires sur les transitions. Ces contraintes sont choisies pour éviter la congestion et éliminer les sommets interdits. Par la suite, un automate accessible contraint (ACA) est conçu par l'analyse en boucle fermée de l'automate contraint, en utilisant le logiciel d'analyse (PHAVer). Ensuite un nouveau Algorithme de synthèse de commande est développé afin de trouver le plan optimal des deux intersections adjacentes. Les résultats obtenus sont comparés avec un logiciel largement utilisé pour l'optimisation des temps de feux de trafic (SYNCHRO) pour montrer l'efficacité de notre approche proposée.

## 4.2 Spécifications de commande

Notre commande s'inscrit dans le cadre des approches qui visent à rechercher une stratégie discrète permettant de restreindre le comportement du SDH pour satisfaire des spécifications de commande imposées [Antsaklis et al., 1993; Koutsoukos et al., 2000; Batis, S., 2013]. Tout l'intérêt de notre commande réside dans le fait d'imposer des spécifications de commande sur l'état continu (nombre des véhicules) en agissant sur l'événement discret (les feux de signalisations), le principe de la synthèse de la commande consiste à associer des spécifications de commande au système. Cela se traduit par des contraintes sur les gardes des transitions.

Dans la suite, nous allons définir les notions relatives aux spécifications de commande ce qui aboutit à un modèle contraint (MC).

**Définition 4.1 : Une contrainte linéaire** est une conjonction d'inégalités rectangulaires (ou polyédrales) sur la variable continue  $X$  de la forme  $Ax_{ij} \sim B$  ou  $\{x_{11}, \dots, x_{ij}\} \in X$  et  $A, B$  sont des valeurs constantes.  $\sim \in (<, \leq, =, \geq, >)$ .

**Définition 4.2 : Une spécification de commande** est une fonction qui associe à chaque

transition une contrainte linéaire. Les spécifications de commande liées au trafic urbain sont notées par  $\varphi_{ij} = (x_{ij} \leq x_{ij}^{Spec})$  tel que  $x_{ij}^{Spec}$  est le nombre des véhicules autorisé dans un tronçon durant la durée de feu rouge, appelée aussi le seuil souhaité. Ces contraintes nous permettent de limiter le nombre de véhicules sur les sections afin d'éviter l'apparition des phénomènes de sursaturation dans le système de trafic considéré.

L'automate hybride rectangulaire contraint est présenté dans la figure suivante

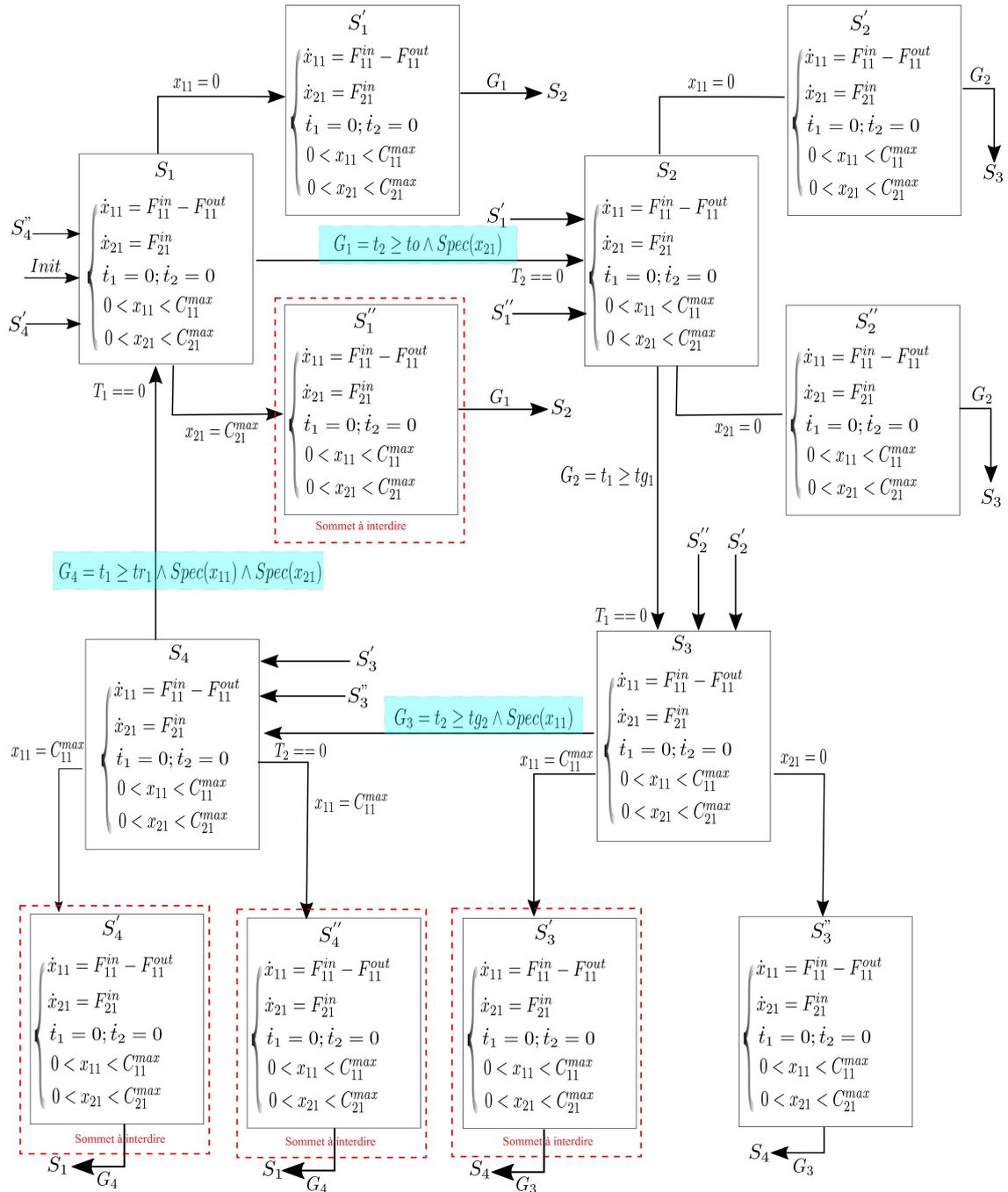


FIGURE 4.1 – Automate hybride rectangulaire contraint

### 4.2.1 Analyse d'atteignabilité de l'AHR Contraint

L'analyse d'atteignabilité en avant de l'automate hybride rectangulaire contraint que l'on réalise grâce à l'utilisation du logiciel d'analyse PHAVer (Frehse 2006) aboutit à l'automate contraint atteignable (ACA) définie formellement ci-dessous :

**Definition 4.3 :** L'automate contraint atteignable est 7-uplet  $ACA = (S_p, v_k^p, U, Dy(s_p), Inv(x_{ij}), Z, \Psi)$

1.  $S_p$  : est un ensemble fini des sommets accessibles (atteignables), avec  $p$  est le nombre des sommets atteignables ;
2.  $v_k^p$  : est un ensemble fini des sommets visités,  $k$  est le nombre de visite de chaque sommets ;
3.  $U$  : est un ensemble fini de transitions ;
4.  $Dy(s_p) : S_p \rightarrow Rect(\dot{X}_{ij} \cup \{\dot{t}_i = 1\})$  est une fonction qui assigne à chaque sommet une représentation de l'évolution continue. L'intervalle  $\gamma_{ij} = [\gamma_{ijmin}^p, \gamma_{ijmax}^p]$  représente le minimum et maximum de flux pour les variables  $x_{ij} \in X_{ij}$  dans chaque sommet ;
5.  $Inv(x_{ij}) : S_p \rightarrow Rect(X_{ij})$  est une fonction qui associe à chaque sommet  $x_{ij}$  et pour l'instant  $t_i$  horloge. Le système peut rester dans un sommet aussi longtemps que l'invariant de sommet est satisfaite ;
6.  $Z$  : est l'espace d'état atteignable des sommets, tel que  $Z_p$  est l'espace d'état atteignable du sommet et  $Z_{p-1}$  est l'espace d'état atteignable de sommet source ;
7.  $\Psi$  : est l'ensemble fini de gardes en amont et en aval  $(\Psi_{ij}^{p-1}, \Psi_{ij}^p)$  tels que :

$\Psi_{ij}^p$  définie par :

- $\Psi_{ij}^q(x_{ij}^q) \in [x_{ijmin}^q, x_{ijmax}^q]$  : expriment les gardes continues ;
- $\Psi_{ij}^p(t_i^p) \in [t_{imin}^p, t_{imax}^p]$  : expriment les gardes temporelles déterminante  $t\phi_p$ .

Où  $q = p - 1$  ( $q = p$ ), définit respectivement la garde en amont (en aval). Chaque sommet de l'ACA a la structure mentionnée ci-dessous :

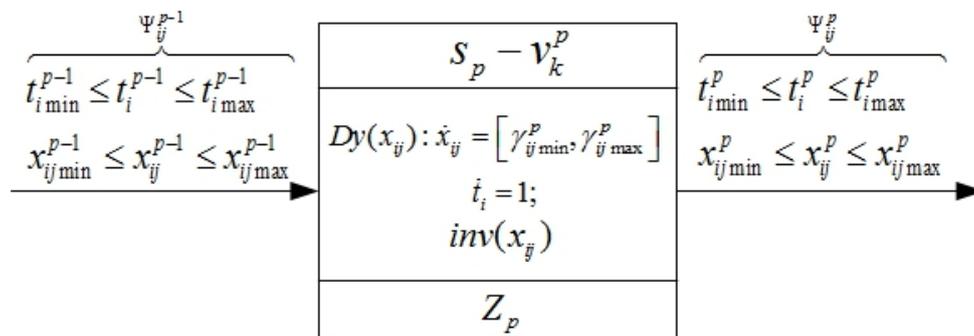


FIGURE 4.2 – Structure d'un sommet de l'ACA

Le calcul de l'espace d'état atteignable dans le sommet  $s_p - v_p^k$  est obtenu grâce à un logiciel PHAVer. Il est déterminé par l'ensemble des inégalités entre les différentes variables d'état ( $x_{ij}$  et  $t_i$ ) comme indique dans l'équation 4.1.

$$Z_p = \begin{cases} a_1 x_{11} + a'_1 x_{21} + \alpha_1 t_1 + \beta_1 t_2 \leq b_1 \\ \vdots \\ a_m x_{11} + a'_m x_{21} + \alpha_m t_1 + \beta_m t_2 \leq b_m \\ 0 \leq x_{11} \leq c_{ij}; 0 \leq x_{21} \leq c_{ij} \end{cases} \quad (4.1)$$

Les limites des intervalles de garde  $\Psi_{ij}^p$  sont calculées à partir de l'espace d'état atteignable  $Z_p$ . Le calcul de l'intervalle de temps de phase  $t_i^p \in [t_{i\min}^p; t_{i\max}^p]$  dans la transition en aval du sommet  $s_p - v_p^k$  se fait dans ce cas, par programmation linéaire utilisant Matlab, comme suit :

- $t_{i\min}^p = \text{Minimum } t_i^p \text{ respectant l'espace d'état atteignable : } Z_p$
- $t_{i\max}^p = \text{Maximum } t_i^p \text{ respectant l'espace d'état atteignable : } Z_p$

Cette programmation linéaire est appliquée pour tous les sommets d'ACA afin de calculer toutes les gardes temporelles. Une fois le modèle ACA est réalisé, nous passons au problème de synthèse du contrôleur qui sera formulé comme suit :

Étant donné un réseau de trafic urbain et en se basant sur le modèle ACA définie précédemment, trouver les nouvelles durées des phases respectant toutes les spécifications de commande imposées (souhaités).

### 4.3 Stratégie de synthèse de commande optimale

Notre stratégie de synthèse de commande optimale est composée de deux étapes :

1. La première consiste à trouver la commande permissive maximale basée sur le calcul de l'intervalle de temps de phases des feux en respectant les spécifications de commande souhaitées.
2. La deuxième étape consiste à trouver un plan de coordination optimale des feux afin de minimiser le degré moyen de saturation et maximiser le débit total de sortie des véhicules.

### 4.3.1 Algorithme de synthèse de commande

Les spécifications de commande souhaitées ajoutées au modèle AHR de la figure 4.1 sont très fort par rapport au système de trafic étudié. En fait, elles peuvent être incompatibles avec la dynamique du sommet correspondant. Ceci revient à calculer la durée de séjour la plus contraignante dans le sommet en question notée par  $\theta_{ij}$ , pour chaque variable  $x_{ij}$ . Cette valeur doit être supérieure à la durée de séjour minimale possible qui correspond à la différence entre la valeur minimale de sortie de l'horloge et la valeur maximale d'entrée de l'horloge  $[t_{imin}^p - t_{imax}^{p-1}]$ , c'est l'idée clé de notre approche de synthèse de commande.

La commande est obtenue en modifiant les gardes sur les transitions de l'ACA telles que les spécifications imposées sont vérifiées de la manière maximum permissive.

La démarche de calcul revient à résoudre le problème pour une transition donnée entre deux sommets ( $S_p$  et  $S_{p-1}$ ).  $\Psi_{ij}^p$  et  $\Psi_{ij}^{p-1}$  sont les gardes intaille, on remonte en arrière pour calculer la nouvelle garde en aval du sommet, cette garde calculée pour la transition entre les deux sommets est notée ( $\tilde{\Psi}_{ij}^{p-1}$ ). Elle est calculée à partir de la gardes d'origine  $\Psi_{ij}^p$  et l'espace accessible d'état atteignable  $Z_p$ .

La procédure de synthèse de commande est formellement donnée par l'algorithme suivant :

---

**Algorithm 1** Algorithme de synthèse de commande
 

---

**Inputs :**  $ACA = (S_p, v_k^p, Dy(s_p), Inv(x_{ij}), Z, \Psi)$ ;

**Outputs :**  $\tilde{T}\phi_p = \{\tilde{T}\phi_1 min, \dots, \tilde{T}\phi_p min; \tilde{T}\phi_1 max, \dots, \tilde{T}\phi_p max\}$

« Calcul\_de\_la\_nouvelle\_garde »;

```

1: for ( $s_p \in S_p$ ) do
2:   for  $\forall(x_{ij} \in X_{ij}) \wedge (j = 1) \wedge (i \in 1, 2)$  do
3:     for ( $\gamma_{ij} > 0$ ) do
4:        $\theta_{ij}^+ = \frac{x_{ijmax}^p - x_{ijmax}^{p-1}}{\gamma_{ijmax}^p}$  calculer la durée de séjour la plus contraignante;
5:       if  $\theta_{ij}^+ \geq (t_{imin}^p - t_{imax}^{p-1})$  then
6:         Il n'y a pas de problème de commande dans ce sommet;
7:       else
8:          $\tilde{x}_{ijmax}^{p-1} = x_{ijmax}^p - \gamma_{ijmax}^p (t_{imin}^p - t_{imax}^{p-1})$ ;
9:          $\tilde{\Psi}_{ij}^{p-1}(x_{ij}) = [x_{ijmin}^{p-1} \tilde{x}_{ijmax}^{p-1}]$  La nouvelle garde continue qui correspond à une
10:        opération maximale permissive;
11:       end if
12:     end for
13:     for ( $\gamma_{ij} < 0$ ) do
14:        $\theta_{ij}^- = \frac{x_{ijmin}^p - x_{ijmin}^{p-1}}{\gamma_{ijmin}^p}$  calculer la durée de séjour la plus contraignante;
15:       if  $\theta_{ij}^- \geq (t_{imin}^p - t_{imax}^{p-1})$  then
16:         Il n'y a pas de problème de commande dans ce sommet;
17:       else
18:          $\tilde{x}_{ijmin}^{p-1} = x_{ijmin}^p + \gamma_{ijmin}^p (t_{imin}^p - t_{imax}^{p-1})$ ;
19:          $\tilde{\Psi}_{ij}^{p-1}(x_{ij}) = [\tilde{x}_{ijmin}^{p-1} x_{ijmax}^{p-1}]$ 
20:         La nouvelle garde continue qui correspond à une opération maximale permissive;
21:       end if
22:     end for
23:      $\tilde{\Psi}_i^{p-1}(t_i) = Z_{p-1} \wedge \tilde{\Psi}_{ij}^{p-1}(x_{ij})$ 
24:   La nouvelle garde temporelle correspond à la nouvelle garde continue est calculée en
25:   utilisant la programmation linéaire (Linprog);
26:    $\tilde{\Psi}_{p-1} = \{\tilde{\Psi}_{ij}^{p-1}(x_{ij}), \tilde{\Psi}_i^{p-1}(t_i)\}$ ;
27: end for
    
```

---

```

21:  for  $k = NV : -1 : 1$  do << p_decrement >>;
22:    for  $p = 4 : -1 : 1$  do
23:      if le sommet  $s_p - v_k^p$  existe then
24:        aller à << Calculdelanouvellegarde >>;
25:      else
26:        aller à << pdécément >>;
27:      end if
28:    end for
29:  end for Vérifiez que tout nouveau garde calculée peut respecter la durée minimale du
    séjour dans chaque emplacement;
30:  for  $\forall (p \in \{1, \dots, 4\}) \wedge (i \in \{1, 2\})$  do Choisissez le temps de phase  $\tilde{\Psi}_i(t_i)$  pour chaque som-
    met en respectant le diagramme espace-temps;
    Mettez le temps de phase choisi dans l'ensemble  $\tilde{T}\phi_p$ ;
31:   $\tilde{T}\phi_p = \{\tilde{T}\phi_{1min}, \dots, \tilde{T}\phi_{pmin}, \tilde{T}\phi_{1max}, \dots, \tilde{T}\phi_{pmax}\}$ ;
32:  end for
33: end for

End

```

---

**Remarque** : Les solutions proposées par l'algorithme de synthèse de commande sont non-déterministes; c-à-dire que les durées de phases obtenues sont exprimés par un intervalle de temps  $\tilde{T}\phi_p = \{\tilde{T}\phi_{pmin}, \tilde{T}\phi_{pmax}\}$ ; tel que :

- $\tilde{T}\phi_{pmin}$  est la nouvelle durée minimale de phase;
- $\tilde{T}\phi_{pmax}$  est la nouvelle durée maximale de phase;

Donc, il existe une infinité de solutions respectent les spécifications de commande imposées de façon maximale permissive. Il est évident que dans une commande des feux de signalisation doit être déterministe (des valeurs fixes de plan des feux). Par conséquent, une technique d'optimisation est introduite pour rendre les résultats déterministe (des valeurs fixe du plan des feux).

### 4.3.2 Formulation d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est défini comme la recherche d'un optimum (minimum ou maximum) d'une ou plusieurs fonctions objective. Quand il s'agit d'une seule fonction à optimiser, nous parlons d'optimisation mono-objective, dans le cas de plusieurs fonctions objectives à optimiser, nous parlons d'optimisation multi-objective.

Dans notre cas, et afin de trouver une valeur fixe de plan de coordination des feux de signalisation, un problème d'optimisation multi-objectif est formulé; deux fonctions objectives sont considérées : minimiser le degré de saturation (volume/capacité) et maximiser le débit de sortie des véhicules avec les contraintes sur les durées de feux.

#### a. Fonction objective

Dans un problème d'optimisation des feux de trafic, le choix des fonctions objectives est une tâche difficile [Hajbabaie, Ali., 2003]. Dans notre cas, nous avons choisi deux fonctions objectives (OB<sub>1</sub> et OB<sub>2</sub>) :

La première fonction (OB<sub>1</sub>) est le débit total des véhicules sortants (total throughput) définie par :

$$OB1 = \max \sum_{i=1}^2 n_i(\tilde{t}\Phi_p) \quad (4.2)$$

$n_i(\tilde{t}\Phi_p)$  [veh/s] est le nombre des véhicules sortant de chaque tronçon  $i$  régi par la relation suivante :

$$n_i(\tilde{t}\Phi_p) = f_i^{sa} \frac{\tilde{t}g_i}{\tilde{t}c} \quad (4.3)$$

ou  $f_i^{sa}$  [veh/s] est le débit de saturation,  $\tilde{t}g_i$  est le temps de vert,  $\tilde{t}c$  est le temps cycle.

La deuxième fonction objective (OB<sub>2</sub>) est la somme moyenne de degré de la saturation définie par :

$$OB2 = \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \varepsilon_i(\tilde{t}\Phi_p) \quad (4.4)$$

$\varepsilon_i(\tilde{t}\Phi_p) = \frac{V_{ij}}{C_{ij}}$  est le degré de saturation déterminé par le rapport du volume  $V_{ij}$  sur la capacité  $C_{ij}$ , la capacité peut être calculée sur la base du temps de feux de signalisation.

**b. Variables de décision**

Les variables de décision sont les paramètres clés de feux de signalisation tels que :  $tc$ ,  $tg_i, tr_i$  et  $to$ . Ce sont les paramètres dont dépend la fonction objectif :

- $\tilde{tc}_{imin}$  et  $\tilde{tc}_{imax}$  La durée minimale et maximale du cycle;
- $\tilde{tg}_{imin}$  et  $\tilde{tg}_{imax}$  La durée minimale et maximale de feu vert;
- $\tilde{tr}_{imin}$  et  $\tilde{tr}_{imax}$  Le durée minimale et maximale de feu rouge;
- $\tilde{to}_{min}$  et  $\tilde{to}_{max}$  La durée minimale et maximale de décalage;

**c. Les contraintes**

Les contraintes suivantes sont des restrictions communes pour les paramètres de commande des feux :

$$\begin{aligned}
 \tilde{tc}_{i \min} &\leq tc_i \leq \tilde{tc}_{i \max} \\
 \tilde{tg}_{i \min} &\leq tg_i \leq \tilde{tg}_{i \max} \\
 \tilde{tr}_{i \min} &\leq tr_i \leq \tilde{tr}_{i \max} \\
 \tilde{to}_{i \min} &\leq to \leq \tilde{to}_{i \max}
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

Il convient de noter que chaque paramètre décision est limité par des seuils minimal et maximal comme l'indique l'équation 4.5. Par conséquent toutes ces valeurs minimales et maximales de plan de coordination des feux de signalisation sont obtenues à partir de l'algorithme de synthèse de commande proposée. Pour fournir une gamme réaliste pour la solution optimale, le modèle d'optimisation proposé comprend également des contraintes non négatives pour les paramètres de commande.

En résumé, la formulation de problème d'optimisation, en respectant les contraintes imposées, peut être récapitulée ci-dessous

$$\min f(t\phi_i) = \begin{cases} \text{OB1} = \max \sum_{i=1}^2 n_i(\tilde{t\phi}_p) i \\ \text{OB2} = \min \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \epsilon_i(\tilde{t\phi}_p) i \end{cases}
 \tag{4.6}$$

sous les contraintes : Eq.4.5

**4.3.3 Algorithme de solution**

Le problème d'optimisation formulé se compose d'une formulation complexe, y compris les fonctions objectives non linéaires qui sont difficiles pour trouver une solution optimale globale grâce à des approches d'optimisation traditionnelles.

Dans cette étude, nous explorons un algorithme génétique (AG) basée sur l'heuristique pour obtenir une solution efficace de la coordination des feux de signalisation [Hermitte, L & Demmou, H, 2001].

#### a. L'algorithme génétique

Les algorithmes génétiques tentent de simuler le processus d'évolution naturelle suivant le modèle darwinien dans un environnement donné. Ils utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique naturelle. Cependant, les processus naturels auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. On parlera ainsi d'individu dans une population. L'individu est représenté par un chromosome constitué de gènes qui contiennent les caractères héréditaires de l'individu. Les principes de sélection, de croisement, de mutation s'inspirent des processus naturels du même nom.

Pour un problème d'optimisation donné, un individu représente un point de l'espace d'états, une solution potentielle. On lui associe la valeur du critère à optimiser, son adaptation. On génère ensuite de façon itérative (figure 4.4) des populations d'individus sur lesquelles on applique des processus de sélection, de croisement et de mutation. La sélection a pour but de favoriser les meilleurs éléments de la population pour le critère considéré (les mieux adaptés), le croisement et la mutation assurent l'exploration de l'espace d'états.

On commence par générer une population aléatoire d'individus. Pour passer d'une génération  $K$  à la génération  $K + 1$ , les opérations suivantes sont effectuées. Dans un premier temps, la population est reproduite par sélection où les bons individus se reproduisent mieux que les mauvais. Ensuite, on applique un croisement aux paires d'individus (les parents) d'une certaine proportion de la population (probabilité  $P_c$ , généralement autour de 0.6) pour en produire des nouveaux (les enfants). Un opérateur de mutation est également appliqué à une certaine proportion de la population (probabilité  $P_m$ , généralement très inférieure à  $P_c$ ). Enfin, les nouveaux individus sont évalués et intégrés à la population de la génération suivante 2.

Plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme sont possibles : le nombre de générations peut être fixé a priori (temps constant) ou l'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus suffisamment rapidement. Pour utiliser un algorithme génétique sur un problème d'optimisation on doit donc disposer d'un principe de codage des individus, d'un mécanisme de génération de la population initiale et d'opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace de recherche [Barnier, N & Brisset, P, 1999].

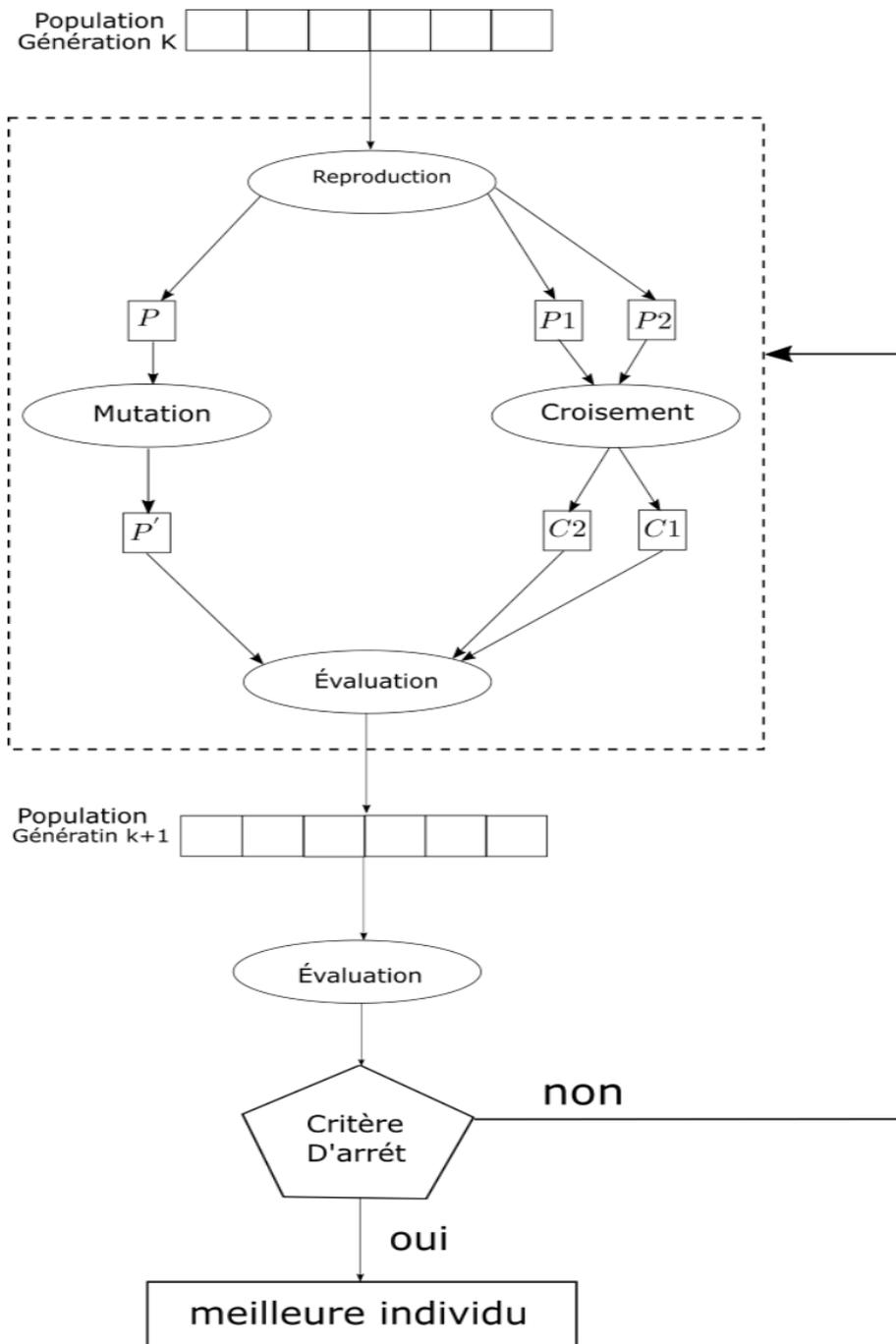


FIGURE 4.3 – Schéma récapitulatif de principe d'algorithme génétique (AG)

**b. Codage de l'AG pour l'optimisation des feux de signalisation**

• **Codage d'une population**

Le premier pas dans l'implantation des algorithmes génétiques est de créer une population d'individus initiaux. En effet, les algorithmes génétiques agissent sur une population d'individus, et non pas sur un individu isolé. Par analogie avec la biologie, chaque individu de la population est codé par un chromosome ou génotype. Une population est donc un ensemble de chromosomes. Chaque chromosome code un point

de l'espace de recherche. L'efficacité de l'algorithme génétique va donc dépendre du choix du codage d'un chromosome.

- **Structure d'un chromosome**

Les chromosomes sont les solutions possibles qui forment toute la population  $K$  dans le processus de l'algorithme génétique. Un seul chromosome est utilisé pour coder l'information entière d'une solution. Dans l'algorithme génétique pour l'optimisation de plan de coordination des feux de signalisation. Un chromosome contient des paramètres de synchronisation du feu dans deux intersections adjacentes telles que :  $tc, tg_i, tr_i$  et  $to$  exprimées par les durées de phase  $t\phi_i$  comme indique dans la figure suivante :

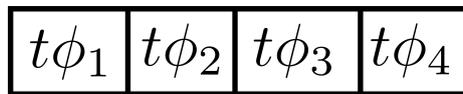


FIGURE 4.4 – Structure d'un chromosome.

- **Fonction de fitness**

La fonction de fitness est appelée fonction d'adaptation ou fonction d'évaluation. Pour calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, on utilise une fonction d'évaluation. L'évaluation d'un individu ne dépendant pas de celle des autres individus, le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante : c'est le rôle de la fonction fitness. Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population. Pour les deux intersections adjacentes, les fonctions de fitness sont les fonctions objectives OB1 et OB2

La figure 4.5 présente le schéma récapitulatif de la démarche adoptée pour développer la stratégie de commande optimale proposée dans cette thèse.

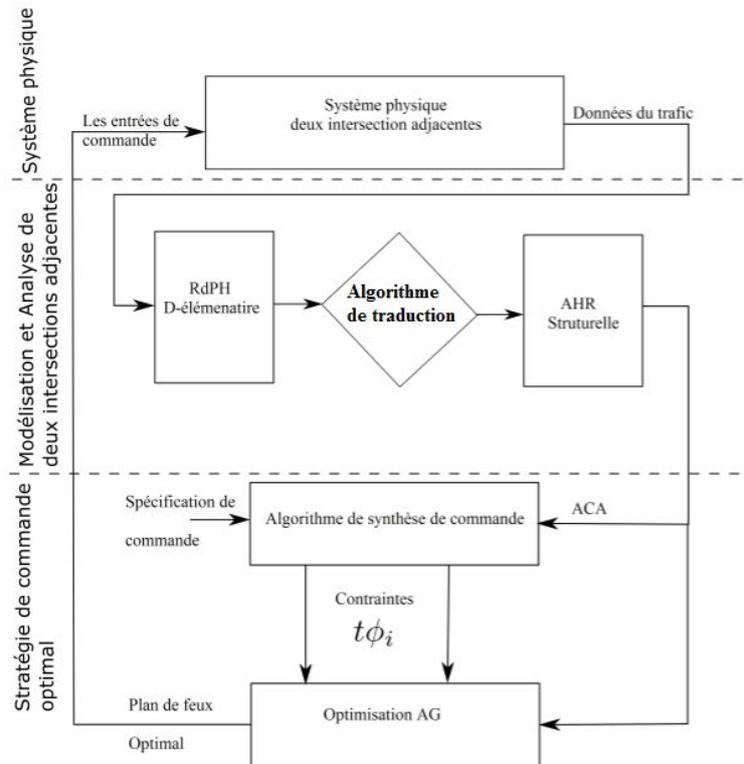


FIGURE 4.5 – Schéma de la stratégie de commande proposée

## 4.4 Tests numériques

### 4.4.1 Description de la zone d'études

En Algérie, la situation n'est pas si loin des autres situations existantes partout dans le monde; les tronçons urbains des grandes villes connaissent une congestion importante et croissante; cela représente beaucoup d'heures perdues par les utilisateurs dans les embouteillages qui paralysent les plus grandes villes durant les heures allant de 7 h à 20 h.

Nous procédons ci-après à l'étude des performances de l'approche développée précédemment sur un tronçon urbain. Le site d'étude choisi est un réseau artériel 1<sup>er</sup> Novembre 1954 à la ville de Guelma, cette ville située au nord-est d'Algérie. Cette artère s'étend du nord-est au sud-ouest du centre-ville, comprend de multiples intersections qui souffrent souvent de la congestion. Cette situation rend la circulation plus lente et même difficile, surtout aux heures de pointe. L'étude expérimentale est réalisée sur deux intersections adjacentes du réseau artériel, la zone d'étude et leur configuration expérimentales sont présentées sur les figures suivantes :



FIGURE 4.6 – Carte de wilaya de Guelma



FIGURE 4.7 – Présentation de la zone d'étude

Les paramètres du réseau artériel sont donnés comme suit : La longueur des voies  $l_{11}$  et  $l_{21}$  de la rue principale est respectivement 120 m et 100 m ; la vitesse d'écoulement libre des deux rues principales et secondaires est 48.3 km/h (30 mph) ; le débit des véhicules de sortie de chaque intersection est 1629 (vph). Pour chaque tronçon, les mouvements considérés sont : tourne à gauche et tourne à droite.

Les débits d'entrées de chaque tronçon pour trois scénarios sont donnés dans le tableau :4.1 :

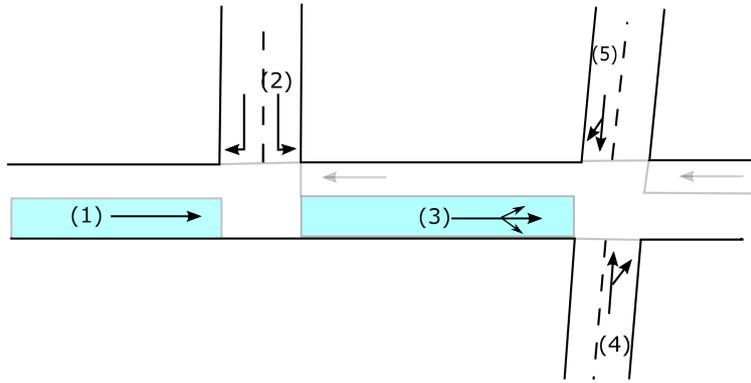


FIGURE 4.8 – La configuration géométrique de la zone d'étude.

TABEAU 4.1 – les différents scénarios expérimentaux de volume du trafic

Demande de trafic (vph)	Débit d'entrée (vph)				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Scénario 1	424	188	612	300	300
Scénario 2	812	348	1160	800	750
Scénario 3	1324	236	1560	1000	900

Pour appliquer notre stratégie de commande optimale, nous suivons les étapes suivantes :

- Étape 1 : Modéliser les deux intersections adjacentes par RdPH D-élémentaire ;
- Étape 2 : Construire l'AHR structurel en utilisant la procédure de traduction présentée dans chapitre 3 ;
- Étape 3 : Analyser en boucle ouverte le modèle obtenu de trafic ;
- Étape 4 : Réaliser l'automate contraint en ajoutant les contraintes linéaires qui représentent les spécifications de commande souhaitées sur les transitions d'AHR structurels, qui sont définies ci-dessous :

—  $\varphi_{11} = (x_{11} \leq x_{11}^{Spec})$  est la contrainte linéaire sur le tronçon  $l_{11}$  représente la limite du nombre des véhicules exprimée par le seuil  $x_{11}^{Spec} = 10$  (veh) ;

—  $\varphi_{21} = (x_{21} \leq x_{21}^{Spec})$  est la contrainte linéaire sur le tronçon  $\varphi_{11}$  , représente la limite du nombres des véhicules exprimé par le seuil  $x_{21}^{Spec} = 10$  (veh) ;

- Etape 5 : Construire l'automate contraint atteignable ACA est déterminé en utilisant l'analyse atteignabilité en avant basé sur le logiciel (PHAVer). Les gardes de transition sont déterminés en utilisant la technique de programmation linéaire.
- Etapes 6 : Appliquer l'algorithme de commande afin de déterminer les durées de phases respectant les spécifications de commande.

- Etapes 7 : Formuler le problème d'optimisation dans le but de déterminer un plan de feux optimal

Les contraintes sur les feux de signalisation sont données par l'algorithme de commande. L'optimisation de l'algorithme génétique est réalisée avec les paramètres suivants :

- La taille de la population est 30;
- Le nombre maximum de génération est 200;
- La probabilité de croisement est 0.5;
- La probabilité de mutation est 0.03.

#### 4.4.2 Résultats expérimentaux et discussions

Dans ce paragraphe, nous présentons l'évolution de nombre des véhicules dans les deux tronçons  $l_{11}$  et  $l_{21}$  sans et avec l'application de la stratégie de commande développée dans cette thèse. Une simulation de file d'attente sous logiciel Matlab/stateflow a été établie durant 500s pour le scénario 3. Les résultats sont présentés dans les figures suivantes :

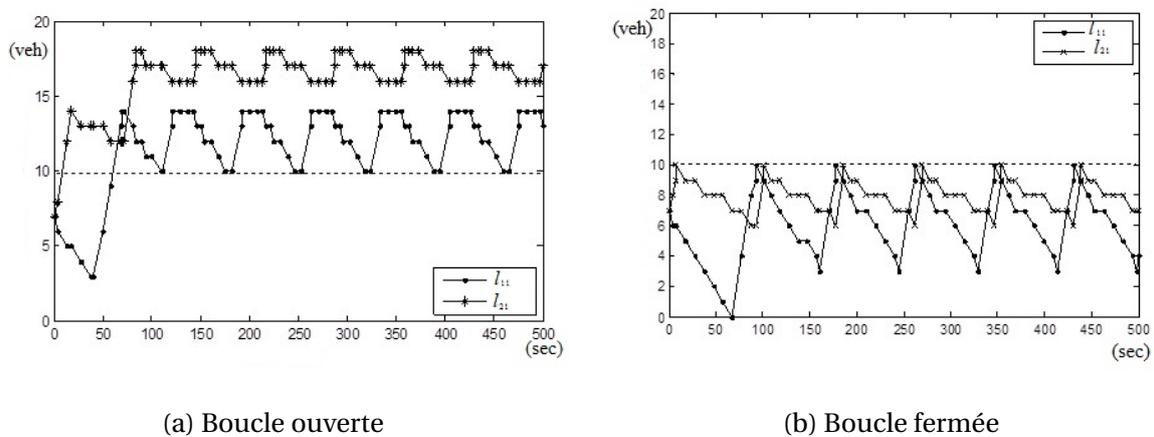


FIGURE 4.9 – Nombre des véhicules dans  $l_{11}$  et  $l_{21}$  sans et avec l'application de la stratégie de commande proposée

La figure 4.9a montre l'évolution du nombre des véhicules dans les tronçons ( $l_{11}$  et  $l_{21}$ ) des deux intersections adjacentes sous scénario 3. La simulation est réalisée en boucle ouverte c'est-à-dire sans l'application de la stratégie de synthèse de commande optimale développée. La dynamique des véhicules dans les deux tronçons ne satisfait pas les spécifications de commande, nous constatons qu'après certains temps de simulation le nombre des véhicules atteint leur capacité maximale dans les deux tronçons. Autrement dit les spécifications de commande sont violées (dépassement de seuil).

Dans figure 4.9b, la simulation est réalisée en boucle fermée c'est-à-dire avec l'application de la stratégie de commande optimale. Cette dernière permet corriger et limiter l'évolution du nombre des véhicules dans les deux tronçons, ou les spécifications de commande sont vérifiées. On constate qu'avec la commande, une diminution des véhicules sur les tronçons, ceci nous permet d'éviter la congestion et les phénomènes de sursaturation.

Dans le but d'illustrer les avantages de la stratégie de commande optimale proposée, une comparaison numérique entre les nouveaux plans des feux de signalisation optimisés obtenus à partir de la stratégie proposée et ceux de Synchron.

Les tableaux 4.2 et 4.3 montrent l'optimisation et la comparaison des résultats de la stratégie de synthèse de commandes optimales proposées et de Synchron sous trois scénarios présentés dans tableau 4.1.

TABLEAU 4.2 – Plan de feux obtenu par stratégie proposée et Synchron

Scénarios	Intersections	$tc$ (s)		$to$ (s)		$tg$ (s)	
		$I_a$ <sup>1</sup>	$I_b$ <sup>2</sup>	$I_a$	$I_b$	$I_a$	$I_b$
Scénarios 1	1	58	52	0	0	34	29
	2			11	2	34	31
Scénarios 2	1	66	60	0	0	40	38
	2			14	8	45	34
Scénarios 3	1	104	100	0	0	72	62
	2			17	10	70	52

TABLEAU 4.3 – Comparaison des résultats numériques

Scénarios	Fonction objectif	$I_a$	$I_b$	Amélioration <sup>3</sup>
Scénarios 1	OB1	1910	1880	+ 0.015
	OB2	0.54	0.63	-0.14
Scénarios 2	OB1	2098	1994	+0.05
	OB2	0.9334	1.24	- 0.24
Scénarios 3	OB1	2224	1857	+0.19
	OB2	1.29	1.61	-0.198

1. Stratégie de commande optimale

2. logiciel SYNCHRO

3. Amélioration= $(I_a - I_b) / I_b$

Comme indique dans le tableau 4.3, on peut parvenir aux conclusions suivantes :

- Pour les scénarios 1 et 2 ou de demande faible et moyenne, une longueur de cycle courte a été obtenue à partir de stratégie de commande proposée, dans le but de maximiser le débit de sortie des véhicules OB1 et minimiser le degré de saturation OB2. Par conséquent, la stratégie de synthèse de commande optimal proposé surpasse le Synchro en termes de fonctions objective OB1 et avec une amélioration de 0.5% et 1.5% pour les deux scénarios respectivement. En termes de fonction OB2, nous avons une amélioration de 0.14% et 0.18% respectivement pour les deux scénarios.
- Pour le dernier le scénario ou la demande est très élevé, un cycle commun très long est obtenu, et une durée de feux vert est grande pour maximiser les véhicules sortant. la stratégie de commande optimale proposée surpasse le Synchro en termes de fonctions objective OB1 avec une amélioration de 19% et pour OB2, une amélioration de 20%.

Les résultats obtenus dans les tableaux 4.2 et 4.3 montrent que l'approche de commande proposée réduit le degré de saturation et augmente le débit total des véhicules sortant de facons plus efficaces par rapport aux les résultats obtenus par Synchro pour les trois scénarios. La comparaison effectuée nous permet de conclure que la stratégie de commande proposée est plus efficace que le logiciel Synchro pas seulement en matière de fonction objective proposée mais aussi permettra d'éviter les phénomènes de congestion tels que : la file d'attente résiduelle et le Spillback en raison de l'utilisation de notre modèle proposé.

## 4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé notre stratégie de commande optimale pour deux intersections adjacentes sur des différentes conditions de trafic en se basant sur le modèle présenté dans chapitre précédent.

Les différentes étapes de notre stratégie sont résumées comme suit :

1. Définition des spécifications de commande qui sont exprimés par des contraintes linéaires dans le but de répondre aux problèmes de congestion dans les deux intersections adjacentes considérées.
2. Ajout de spécifications de commande désirées au modèle hybride obtenu dans le chapitre 3. Ces contraintes sont imposées aux variables d'état sur les gardes de transition de l'automate. Elles sont ajoutées indépendamment du comportement du système de

trafic, elles peuvent alors être inconsistantes avec la dynamique du système. L'automate obtenu est appelé automate hybride rectangulaire contraint.

3. Application d'une analyse d'atteignabilité en avant d'automate hybride rectangulaire contraint en utilisation le logiciel PHAVer, pour la construction d'une automate contraint atteignable (ACA).
4. Application de l'algorithme de synthèse de commande afin de déterminer les durées des phases respectant les spécifications de commande désirées de façon maximale permissive.
5. Formulation d'un problème d'optimisation multi-objective en utilisation l'algorithme génétique afin de déterminer des valeurs déterministes du plan des feux de coordination optimales.

# Conclusion générale et perspectives

*« Le recherche scientifique ressemble beaucoup à celle de l'or : vous sortez et vous chassez, armé de cartes et d'instruments, mais en fin de compte, ni vos préparatifs, ni même votre intuition ne comptent. Vous avez besoin de votre chance. »*

---

La Variété Andromède (1969) de

Michael Crichton

## Conclusion générale

La congestion du trafic routier est l'un des problèmes socio-économiques qui doivent être résolus pour supporter l'évolution de la société. La solution appropriée est de trouver des algorithmes de commande pour prévenir l'apparition de la congestion routière. Pour implémenter avec succès de tels algorithmes, une bonne modélisation de la dynamique du trafic routier est aussi nécessaire.

Nous avons présenté au cours de cette thèse des travaux et des résultats relatifs à la modélisation, et à la commande des systèmes de trafic urbain. L'étude de ces systèmes est abordée dans le cadre des systèmes dynamiques hybride. Pour mener cette étude, nous avons adapté deux outils de modélisation développés pour les systèmes de production, à savoir les réseaux de Petri hybride et les automates hybrides.

Dans un premier temps, nous avons opté à la modélisation et commande de système de trafic par automate hybride au regard de la facilité de représentation et la manipulation formelle. Mais malgré la puissance d'analyse par les automates hybride, cet outil reste limité dans le cas des systèmes complexes. Pour cela, nous avons développé un modèle combiné par traduction entre les deux modèles hybrides, les automate hybrides et les réseaux de Petri hybrides.

Tout d'abord, nous avons utilisé le modèle de réseaux de Petri hybrides D-élémentaires pour la modélisation du système de trafic urbain. Cet outil possède une grande capacité de modélisation et il est bien adapté pour la représentation des systèmes hybrides complexes. Ensuite un algorithme de passage des réseaux de Petri hybrides D-élémentaires en automates hybrides rectangulaire a été utilisé pour pouvoir combiner la capacité de modélisation des RdPH à la capacité d'analyse des AH. Le modèle de trafic obtenu est représenté par un automate hybride rectangulaire illustre les différents modes de fonctionnement du système de trafic urbain. En se basant sur ce modèle, une stratégie de synthèse de commande optimale est proposée, cette approche de commande permet d'éviter les phénomènes de sursaturations et la congestion dans les zones urbaines.

Notre contribution et l'originalité de ce travail sont résumées en :

- Modélisation d'un comportement d'écoulement de la circulation à deux intersections adjacentes en utilisant le réseau de Petri hybride D-élémentaire ;
- Construction d'un modèle de trafic par automate hybride rectangulaire.
- Conception d'une nouvelle stratégie de synthèse de commande optimale basée sur le modèle combiné de trafic.

## **Perspectives de recherche**

Les travaux présentés dans cette thèse peuvent être développés dans quelques directions. Les perspectives de recherche les plus prometteuses sont considérées ci-dessous.

- L'extension de notre approche de commande pour un réseau de trafic à grande échelle fait l'objet d'un travail de recherche en cours.
- L'hypothèse de considérer l'arrivée et le départ des taux moyens de voitures sont constants sur un cycle est vraiment restrictif. Nous devons discuter de la relaxation de cette hypothèse dans les futurs travaux.
- L'approche proposée dans cette thèse est basée sur la stratégie de contrôle des feux fixe; ce dernier rend la décision de contrôle en boucle ouverte. Dans les techniques en temps réel, le système doit être capable de s'adapter immédiatement (ou très brièvement) aux conditions de trafic, et d'optimiser le contrôle des feux. ce type de stratégies de contrôle sera considéré dans les futurs travaux.

# Références bibliographiques

*« L'humilité pour un scientifique est  
d'accepter que rien ne soit impossible. »*

---

Le Premier Jour (2009) de Marc Lévy

## Références

- Abu-Lebdeh, G. & Benekohal, R., 2000. Genetic Algorithms for Traffic Signal Control and Queue Management of Oversaturated Two-Way Arterials. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, 1727, pp.61–67. Available at : <http://dx.doi.org/10.3141/1727-08>.
- Abu-Lebdeh, G.& Benekohal,.R. F. 1997. Development of Traffic Control and Queue Management Procedures for Oversaturated Arterials. *Transp. Res. Rec* 1603 : 119–27.
- Adams, W.F., 1936. Road traffic considered as a random series. (INCLUDES PLATES). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 4(1), pp.121–130. Available at : <http://dx.doi.org/10.1680/ijoti.1936.14802>.
- Alla, H., & David, R. (2001). On hybrid Petri nets. *Journal of Discrete Allam, M. & Alla, H., 1998. Modeling and simulation of an electronic component manufacturing system using hybrid Petri nets. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 11(3), pp.374–383. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/66.705372>.
- Allsop R.E.,1972 .Delay at a Fixed Time Traffic Signal. *Theoretical analysis. Transportation Science*, Vol. 3, no6, pp. 260-285 (1972).
- Alur, R., et al. 1995. The algorithmic analysis of hybrid systems. *Theoretical Computer Science*, 138(1), pp. 3–34. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3975\(94\)00202-T](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3975(94)00202-T).
- Antsaklis, P. J, et al,. 1993. Hybrid system modeling and autonomous control systems , *Hybrid Systems*, LNCS 736, Springer-Verlag, pp. 366-392.
- Badamchizadeh, M.A. & Joroughi, M., 2010. Deterministic and stochastic Petri Net for urban traffic systems. 2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/iccae.2010.5451406>.
- Balaji, P.G.& Srinivasan, D., 2010. Multi-Agent System in Urban Traffic Signal Control. *IEEE Computational Intelligence Magazine*. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/mci.2010.938363>.
- Bang K.L.,& Nilsson L.E.1976, Optimal Control of Isolated Traffic Signals. *Proc. ARRB*, 8, pp. 16-24 .
- Banks, B. & James H., 2002. *Introduction to Transportation Engineering*, 2nd Ed. McGraw-Hill, San Francisco.

- Batis, S. 2013. Commande d'une classe de systèmes hybrides par automates hybrides rectangulaire. Thèse dirigée au sein du GIPSA-Lab dans l'école doctorale EEATS. UJF Grenoble.
- Beard, C. & Ziliaskopoulos, A., 2006. System Optimal Signal Optimization Formulation. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board, 1978, pp.102–112. Available at : <http://dx.doi.org/10.3141/1978-15>.
- Ben-Akiva, M et al. 2001. Network State Estimation and Prediction for Real-Time Transportation Management Applications, Networks and Spatial Economics. 1(3/4), pp. 293-318.
- Boujard C., 1996. Qualité de l'air : GERTRUDE a la solution, Valeurs vertes (n°19, mars-avril 1996) CEN-TC226, Working Group 4 : Traffic Control (1996) :Terminology, Draft 5. Available at <http://www1.utt.fr/mosim01/pdf/ARTICLE-145.pdf>
- Bouriachi, F & Kechida, S., 2016-a. Hybrid Petri Nets and Hybrid Automata for Modeling and Control of Two Adjacent Oversaturated Intersections. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 27(6), pp.646–657. Available at : <http://dx.doi.org/10.1007/s40313-016-0275-x>.
- Bouriachi, F & Kechida, S., 2016-b. Control of large-scale urban traffic networks using hierarchical hybrid automata. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/icmic.2016.7804212>.
- Bouriachi, F, et al 2013. Modélisation d'un réseau du trafic urbain par Automate hybride. International conference on systems and information processing, May 12–14, Guelma, Algeria.
- Braban, C. & Boillot, F, 2000. Les systèmes temps réel de commande de feux en milieu urbain, Synthèse INRETS .Publisher : Institut de Recherche des Transports.
- Brahmia, N. 2014. Mesure des données du trafic. Mémoire de Mastre à l'université de 8mai 1945 Guelma.
- Branislav H, & Meng-Chu Z., 2007. Modeling and Control of Discrete-Event Dynamic Systems. Edited by Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing.
- Brockfeld, E. et al., 2001. Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic. Physical Review E, 64(5). Available at : <http://dx.doi.org/10.1103/physreve.64.056132>.
- Catalin, D., 2012. Contributions à la modélisation et la commande des réseaux de trafic routier. Ecole Centrale de Lille; Universitatea politehnica (Bucarest).

- Certu, 2000. Les capteurs vidéo de trafic. Collection du certu. Chandler, R.E., et al. 1958. Traffic Dynamics : Studies in Car Following. *Operations Research*, 6(2), pp.165–184. Available at : <http://dx.doi.org/10.1287/opre.6.2.165>.
- Chang, T. et al., 2004. Modeling and Optimization of an Oversaturated Signalized Network. *Transportation Research Part B : Methodological* 38 (8) : 687–707. doi :10.1016/j.trb.2003.08.002.
- Chang, T.H, & Jen-Ting L., 2000. Optimal Signal Timing for an Oversaturated Intersection. *Transportation Research Part B : Methodological* 34 (6) : 471–91. doi :10.1016/S0191-2615(99)00034-X.
- Chen, B. & Cheng, H.H., 2010. A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems. *IEEE Transactions of Intelligent Transportation Systems* volume 11(2), pp.485-497 Available at : <https://doi.org/10.1109/tits.2010.2048313>
- Chen, F. et al., 2014. A novel hybrid petri net model for urban intersection and its application in signal control strategy. *Journal of the Franklin Institute*, 351(8), pp.4357–4380. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.05.002>
- Chen, Y. et al., 2015. Dynamic Graph Hybrid Automata : A Modeling Method for Traffic Network. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 1396–1401. doi :10.1109/ITSC.2015.229.
- Chen, Y. et al., 2015. Dynamic Graph Hybrid Automata : A Modeling Method for Traffic Network. 2015 IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/itsc.2015.229>.
- Cohen S., 1991 Flow Variables. *Concise Encyclopaedia of Traffic and Transportation Systems*, Editor Papageorgiou M., pp. 139-143.
- Cohen, S., 1990. *Ingénierie du trafic routier, éléments de théorie du trafic et applications*. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC).
- Daganzo, C.F., 1994. The cell transmission model : A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. *Transportation Research Part B : Methodological*, 28(4), pp.269–287. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)90002-7](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(94)90002-7).
- Daganzo, C.F., 1995. The cell transmission model, part II : Network traffic. *Transportation Research Part B : Methodological*, 29(2), pp.79–93. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)00022-r](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(94)00022-r).

- David, R. & Alla, H., 2001. On Hybrid Petri Nets. *Discrete Event Dynamic Systems* 11 (1-2). Kluwer Academic Publishers : 9–40. doi :10.1023/A :1008330914786.
- David, R. & Alla, H., 1998. A modelling and analysis tool for discrete events systems : continuous Petri net. *Performance Evaluation*, 33(3), pp.175–199. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/s0166-5316\(98\)00016-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0166-5316(98)00016-9).
- David, R., & Alla, H. 2004. Anon, 2005. *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*. Petri nets (2nd ed.). Berlin : Springer Available at : <http://dx.doi.org/10.1007/b138130>.
- Di Febbraro, A. Sacone, S.1998, Hybrid Petri nets for the performance analysis of transportation systems. *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control* (Cat. No.98CH36171). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/cdc.1998.758197>.
- Di Febbraro, A. & Sacco, N., 2004. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets. *Control Engineering Practice*, 12(10), pp.1225–1239. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.04.008>.
- Di Febbraro, A., et al., 2016. A Deterministic and Stochastic Petri Net Model for Traffic-Responsive Signaling Control in Urban Areas. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2), pp.510–524. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2015.2478602>.
- Dongbin, Z., et al, 2012. Computational Intelligence in Urban Traffic Signal Control : A Survey. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 42(4), pp.485–494. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/tsmcc.2011.2161577>
- Elloumi, N., 1996. Modélisation et commande du trafic sur un corridor : application de la méthode LP . Thèse de l'université Paris XI Orsay.
- Ellson, D. G . 1949. The Application of Operational Analysis to Human Motor Behavior, *Psychology Review* 9, pp. 56. *Event Dynamic Systems*, 8(1–2), pp : 9–40.
- Farhi, N., 2008. Modélisation minplus et commande du trafic de villes régulières. Thèse de doctorat, Université de Paris I-Panthéon-Sorbonne, Paris, France.
- Feng, J.& Shiliang, S., 2008. Neural network multitask learning for traffic flow forecasting. 2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence). Available at <http://dx.doi.org/10.1109/ijcnn.2008.4634057>
- Feng, Qi., et al., 2008. A Recurrent Neural Network approach to traffic matrix tracking using partial measurements. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/iciea.2008.4582797>

- FHW, 1976. Traffic Control Systems Handbook. US Department Of Transportation Stock No. 050-001-00114-4, juin 1976, Available at : <http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwahop06006/index.htm>
- Frehse, G., 2006. "PHAVer : Algorithmic Verification of Hybrid Systems Past HyTech," no. Hscc 2005 : 258–73.
- Gartner N.H., et al. 1991. Evaluation of the Optimized Policies for Adaptive Control (OPAC) Strategy. Transportation Research Record 1324, pp.105-114.
- Gartner, N.H., 1990. OPAC : strategy for demand-responsive decentralized traffic signal control. Control, Computers, Communications in Transportation, pp.241–244. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-037025-5.50041-4>.
- Gartner, N.H., et al. 1990. MULTIBAND – A variable bandwidth arterial progression scheme, Transportation Research Record 1287, p.p. 212-222. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=352882>.
- Gawron, C. 1998. Simulation-Based Traffic Assignment; Computing User Equilibria in Large Street Networks, PhD thesis, University of Cologne, Cologne.
- Gazis, D. C., 1964. Optimum Control of a System of Oversaturated Intersections. Operations Research 12 (6). INFORMS : 815–31. doi :10.1287/opre.12.6.815.
- Gettman, D. et al., 2014. Operation of Traffic Signal Systems in Oversaturated Conditions, Volume 2 Final Report. Available at : <http://dx.doi.org/10.17226/22289>.
- Ghomri, L et al. 2005. Structural and Hierarchical Translation of Hybrid Petri Nets in Hybrid Automata. In Proceedings of IMACS 2005. Paris, France.
- Ghomri, L., & Alla. H., 2007. Modeling and Analysis Using Hybrid Petri Nets. Nonlinear Analysis : Hybrid Systems 1 (2) : 141–53. doi :10.1016/j.nahs.2006.04.004.
- Girianna, M., & Benekohal.R., 2002. Dynamic Signal Coordination for Networks with Oversaturated Intersections. Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1811 (January). Transportation Research Board : 122–30. doi :10.3141/1811-15.
- Greenshields, B D et al. 1935. A Study in Highway Capacity. Proc. Highway Research Board, 14(1), pp. 458. Available at : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=120649>

- Greenshields, D. et al, 1947. Traffic performance at urban intersections 1. Bureau Highway Traffic, Yale University Eno Foundation for Highway Traffic Control Available at : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=117305>.
- Gundogan, F. & Fellendorf, M., 2011. Pattern recognition method for simplified coordinated traffic signal control. 2011 IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/fists.2011.5973628>
- Guo, D., et al, 2003. A Study on the Framework of Urban Traffic Control System. IEEE Intelligent Transportation Systems, 2003, p. 842-846. Available at : <http://ieeexplore.ieee.org/document/1252068/>
- Guo, X. & Zhu, Q., 2009. A traffic flow forecasting model based on BP neural network. 2009 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/peits.2009.5406865>
- Hajbabaie, A., 2013. Traffic Signal Timing Optimization : Choosing the Objective Function. Submitted for consideration for publication and presentation at the 92th Annual Meeting of the 28 Transportation Research Board, January 13-17.
- Hajbabaie, A., & Benekohal, R., 2015. A Program for Simultaneous Network Signal Timing Optimization and Traffic Assignment. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems intelligent Transportation Systems, 16 (5) : 2573–86.
- Han, K., & Vikash V., 2015. Continuum Signalized Junction Model for Dynamic Traffic Networks : Offset, Spillback, and Multiple Signal Phases. Transportation Research Part B : Methodological 77. Elsevier Ltd : 213–39. doi : [10.1016/j.trb.2015.03.005](https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.03.005).
- Hegyí, A., 2004. Model predictive control for integrating traffic control measures”, TRAIL Thesis series T2004/2, the Netherland TRAIL research school.
- Heidemann D., 1996. “A Queueing Theory Approach to Speed-Flow-Density Relationships”. Proc. 13th Symp. Int. Conf. Transp. and Traffic Theory, pp. 103-118 (Lyon-France).
- Henry J-J, & Farges J-L., 1989. PRODYN, Proceedings of the 6th IFAC/IPIF/IFORS Symposium on Control, Computer and Communication in Transportation, IFAC Symposia Series, 1990, N 12.
- Henry, J.J, et al. 1984. the prodyn real time traffic algorithm. Control in Transportation Systems, pp.305–310. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-029365-3.50048-1>.

- Henzinger, T. A. et al., 1998. What's Decidable about Hybrid Automata?. *Journal of Computer and System Sciences* 57 (1) : 94–124. doi :10.1006/jcss.1998.1581.
- Henzinger, T.A. & Ho, P.-H., 1995. Algorithmic analysis of nonlinear hybrid systems. *Lecture Notes in Computer Science*, pp.225–238. Available at : <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-60045-0-53>.
- Hermitte, L & Demmou, H, 2001. Une methode de controle de trafic urbain par algorithmes genetiques. 3e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation MOSIM'01 – du 25 au 27 avril 2001 - Troyes (France).
- Huang, Y.-S. & Chung, T.-H., 2010. Modelling and Analysis of Traffic Light Control Systems Using Timed Coloured Petri nets. *Petri Nets Applications*. Available at : <http://dx.doi.org/10.5772/7497>.
- Huang, Y-S, et al. 2014. Modular Design of Urban Traffic-Light Control Systems Based on Synchronized Timed Petri Nets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 15 (2) : 530–39.
- Huimin, W., et al.2001, A new algorithm of incident detection on freeways. IVEC2001. Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference 2001. IVEC 2001 (Cat. No.01EX522). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/ivec.2001.961753>
- Hunt P.& R. Bretherton. 1982. The SCOOT on-Line Traffic Signal Optimization Technique. *Traffic Eng. Control* 23 : 190–92.
- Hunt P-B, et al. 1981. SCOOT - A traffic responsive method of coordinating signals, TRRL Report N 1014. <http://worldcat.org/issn/02667045>.
- Hunt, P. B., et al. 1982, the SCOOT on line traffic signal optimization technique. *Traff. Engin. Contr.* 23, 190. Available at : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=186640>.
- Jang, K., et al., 2015. Traffic Signal Optimization for Oversaturated Urban Networks : Queue Growth Equalization 1–8.
- Jayakrishnan, R. et al., 1994. An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 2(3), pp.129–147. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/0968-090x\(94\)90005-1](http://dx.doi.org/10.1016/0968-090x(94)90005-1).
- Jbira, M.K. & Ahmed, M., 2011. Computer Simulation : A Hybrid Model for Traffic Signal Optimisation. *Journal of Information Processing Systems*, 7(1), pp.1–16. Available at : <http://dx.doi.org/10.3745/jips.2011.7.1.001>.

- Júlvez, J. & Boel, R., 2005. Modelling and controlling traffic behaviour with continuous petri nets. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), pp.43–48. Available at : <http://dx.doi.org/10.3182/20050703-6-cz-1902.00292>.
- Kachroo,P. & Krishen, K. 2000. System Dynamics and Feedback Control Design Problem Formulations for Real Time Ramp Metering, *Transactions of Society for Design and Process Science*.
- Kamata, J. & Oda, T., 1991. Detectors for Road Traffic. *Concise Encyclopedia of Traffic Transportation Systems*, pp.96–101. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-036203-8.50026-2>.
- Kechroudi, S., 2010. Commande et optimisation pour la régulation du trafic urbain multimodale sur de grands réseaux urbains, Thèse de doctorat de l'université d'Evry Val d'Essone , France.
- Kim, Y., 2010. Traffic Network Control Based on Hybrid System Modeling. *Petri Nets Applications*. Available at : <http://dx.doi.org/10.5772/7498>.
- Kononen, V. & Niittymaki, J.,2000. New methods for traffic signal control-development of fuzzy controller. Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. FUZZ- IEEE 2000 (Cat. No.00CH37063). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/fuzzy.2000.838686>.
- Koutsoukos, X.D, et al. 2000, Supervisory Control of Hybrid Systems , *Proceedings of The IEEE*,. 88(7), pp. 1026-1049.
- Lee, J-H. & Hyung, L-K,. 1999. Distributed and cooperative fuzzy controllers for traffic intersections group. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 29(2), pp.263–271. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/5326.760570>.
- Leonard,D.R. et al, 1989. CONTRAM : structure of the model. *Transportation Research Laboratory, Crowthorn TRL Report RR 178*.
- Lertworawanich, Ponlathep, et al. 2011. A New Multiobjective Signal Optimization for Oversaturated Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 12 (4) : 967–76. doi :10.1109/TITS.2011.2125957.
- Lieberman, Edward, Jinil Chang, and Elena Prassas. 2000. "Formulation of Real-Time Control Policy for Oversaturated Arterials." *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board* 1727 (January). *Transportation Research Board* : 77–88. doi :10.3141/1727-10.

- Lighthill, M.J. & Whitham, G.B., 1955. On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads. *Proceedings of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 229(1178), pp.317–345. Available at : <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0089>.
- Lilin, Z,et al., 2006. An Intelligent Control Method for Urban Traffic Signal Based on Fuzzy Neural Network. 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/wcica.2006.171300>
- List, G.F. & Cetin, M., 2004. Modeling Traffic Signal Control Using Petri Nets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(3), pp.177–187. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2004.833763>.
- Little, J.D.C., 1966. The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming. *Operations Research*, 14(4), pp.568–594. Available at : <http://dx.doi.org/10.1287/opre.14.4.568>
- Liu, D. et al., 2010. Hybrid liveness-enforcing method for Petri net models of flexible manufacturing systems. 2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/icma.2010.5588700>.
- Liu, Ding, Zhiwu Li, & Mengchu Zhou. 2013. Hybrid Liveness-Enforcing Policy for Generalized Petri Net Models of Flexible Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A : Systems and Humans* 43 (1) : 85–97. doi:10.1109/TSMCA.2012.2192266.
- Liu, P., 2007. A Neural Network Approach on Analyzing and Reducing Signalized Intersection Crashes. *Third International Conference on Natural Computation (ICNC 2007)*. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/icnc.2007.79>.
- Lo, H.K. et al. 2001. Dynamic network traffic control. *Transportation Research A* 35(8), pp721-744, Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(00\)00014-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(00)00014-8).
- Lo, Hong K. 1999. A novel traffic signal control formulation, *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 33(6), 1999, pp 433-448, Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564\(98\)00049-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00049-4).
- Lowrie, P.R. 1982. The Sydney Coordinated Adaptive Traffic System - Principles, Methodology, Algorithms', *International Conference on Road Traffic Signaling*, IEE London, n°207, pp. 67-70.

- Maerivoet, S. & De Moor, B., 2005. Cellular automata models of road traffic. *Physics Reports*, 419(1), pp.1–64. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2005.08.005>.
- Messer, C.J., et al, 1973. A variable-sequence multiphase progression optimization program, *Highway Research Record*, no. 445, p.p. 24-33. Available at : <https://trid.trb.org/view.aspx?id=116007>
- Michalopoulos, P.G., & George S., 1977. Oversaturated Signal Systems with Queue Length constraints—I. *Transportation Research* 11 (6) : 413–21. doi :10.1016/0041-1647(77)90006-5.
- Miller A. J., 1965. A Computer Control System for Traffic networks. *Proc. 2nd Int. Symp Theory of Road Traffic Flow*. Editor Almond J. Organisation for Economic Co-operation and development. Paris. pp. 200-220
- Mirchandani P.B., 2002. RHODES : Traffic adaptive control system. Workshop on traffic adaptive control systems, Annual TRB Meeting. Washington, D.C., USA.
- Morgan, J.T. & Little, J.D.C., 1964. Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth. *Operations Research*, 12(6), pp.896–912. Available at : <http://dx.doi.org/10.1287/opre.12.6.896>
- Motallebi, H. et al. 2014. Translation from Multisingular Hybrid Petri Nets to Multisingular Hybrid Automata . *Fundamenta Informaticae* 130, pp : 275–315.
- Murata T., et al, 1986. Petri Net-Based Controller for Flexible and Maintainable Sequence Control and its Application in Factory Automation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 1(33), pp. 1–8.
- Murata, T., 1989. Petri Nets : Properties, Analysis and Applications.” *Proceedings of the IEEE* 77 (4) : 541–80. doi :10.1109/5.24143.
- Nagel K., 1998, Simplified Cellular Automaton Model for City Traffic. *Physical review E*, 58 (02), pp. 1286-1295.
- Newell G.F.,1995. Mathematical Models for Freely Flowing Highway Traffic. *Oper. Res.* 3, pp.176-186.
- Ng, K.M., et al., 2013. A Review on the Applications of Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of Urban Traffic. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(2), pp.858–870. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2013.2246153>.
- Ornfelt, L. & Larsson, A. 1991. LHOVRA -a traffic signal control strategy for isolated junctions, Swedish National Road Administration, 51.

- Papageorgiou, M. et al., 2003. Review of road traffic control strategies. *Proceedings of the IEEE*, 91(12), pp.2043–2067. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/jproc.2003.819610>.
- Papageorgiou, M., 1998. Some remarks on macroscopic traffic flow modelling. *Transportation Research Part A : Policy and Practice*, 32(5), pp.323–329. Available at : [http://dx.doi.org/10.1016/s0965-8564\(97\)00048-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0965-8564(97)00048-7).
- Petri C.A.1962, *Communication with automata*. New York Griffis Air Force Base. Tech. Rep. RADC-TR-65-377.
- Qinghui Lin, Kwan, B.W. & Tung, L.J.,1997. Traffic signal control using fuzzy logic. 1997 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. *Computational Cybernetics and Simulation*. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/icsmc.1997.638241>.
- Ramadge, P. & W. Wonham. 1989, *The Control of Discrete Event Systems*. *Proceedings IEEE : Special Issue on Dynamics of Discrete Event Systems*, 77 (1), pp. 81-98.
- Richards, P.I., 1956. Shock Waves on the Highway. *Operations Research*, 4(1), pp.42–51. Available at : <http://dx.doi.org/10.1287/opre.4.1.42>.
- Robertson D.I et al 1981. SCOOT : A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals. *Transport and Road Research, Laboratory Report n° LR1014*, TRRL. Crowthorne, UK.
- Robertson, D.I. 1969. TRANSYT : A Traffic Network Study Tool. *Road Research Laboratory Report No. RL-253*, Grothorne, Berkshire, England.
- Robertson, D.I. 1997, The TRANSYT method of coordinating traffic signals, *Traffic Engineering and Control*, pp76-77.
- Rohde, Jannis, & Bernhard Friedrich. 2011. “Offset Optimizing with CTM and Genetic Algorithms : Results from Field Studies in Hannover.” *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 20 : 437–44. doi :10.1016/j.sbspro.2011.08.050.
- Rouphail N. et al. 1992. Traffic Flow at Signalized Intersections. Chapter 9 in *Traffic Flow Theory*. Edition <http://www.tfrc.gov/its/tft/tft.htm>.
- Sava, A.T. & Alla, H., 2001. Combining hybrid Petri nets and hybrid automata. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(5), pp.670–678. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/70.964667>.
- Sharma, N. & Sahu, S., 2016. Review of Traffic Signal Control based on Fuzzy Logic. *International Journal of Computer Applications*, 145(13), pp.18–22. Available at : <http://dx.doi.org/10.5120/ijca2016910869>.

- Sheraz, S.M., et al., 2009. Fuzzy Rule Based Traffic Signal Control System for Oversaturated Intersections. 2009 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/cinc.2009.245>.
- Sutarto, H. & Boel, R., 2010. Hybrid Automata Model Approach for Coordinating Traffic Signal Control. In Systems and Control, 29th Benelux Meeting, Book of Abstracts, 363 :01.
- Taylor, F. V. 1949. Certain Characteristics of the Human Serve. Electrical Engineering, 68, pp. 235.
- Teodorović, D., 2008. Swarm intelligence systems for transportation engineering : Principles and applications. Transportation Research Part C : Emerging Technologies, 16(6), pp.651–667. Available at : <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2008.03.002>
- Tolba, C., 2004. Contribution à l'utilisation des réseaux de Petri pour la modélisation et la régulation du trafic urbain et interurbain. Available at : <http://www.theses.fr/2004BESA2034>
- TRB 2010. HCM 2010 Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- Tustin, A. 1947. The nature of the operator response. Manual Control and its Implication for Controller Design. J.I.E.E, 96, pp.56.
- Van Zijverden J.D. & Kwakernaak H., 1969 A New Approach to Traffic-Actuated Computer Control of Intersection. Proc. 4th Int. Symp. Theory of Traffic Flow, Ed. Leutzbach W, Baron P, 86, pp. 113-117.
- Vincent, RA Young, C.P. 1986. Self-optimizing traffic signal control using microprocessors • The TRRL MOVA strategy for isolated intersections. Traffic Engineering and Control, 27, (8), pp. 385-387,
- Wang, P., et al;. 2012. "A Novel Conditional Cell Transmission Model for Oversaturated Arterials." Journal of Central South University 19 (5) : 1466–74. doi :10.1007/s11771-012-1163-6.
- Wannige, C.T. & Sonnadara, D.U.J., 2008. Traffic Signal Control Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference. 2008 4th International Conference on Information and Automation for Sustainability. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/iciafs.2008.4783976>
- Wannige, C.T. & Sonnadara, D.U.J., 2009. Adaptive neuro-fuzzy traffic signal control for multiple junctions. 2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/iciinfs.2009.5429853>.

- Wardrop, J.G., 1952. "Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research". Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part II, U.K. 2(1), pp. 325-362.
- Webster, F.V. 1958. Traffic Signal Settings. Road resea. H.M. Stationery Office. <http://books.google.dz/books?id=c9QOQ4jXK5cC>.
- Whitham, G.B., 1974. Linear and Nonlinear Waves. Edition Wiley Sons, NY. Available at : <http://dx.doi.org/10.1002/9781118032954>.
- Williams J.C et al, 1985. Analysis of Traffic Network Flow Relations and two Model Parameter Sensitivity. Transp. Res. Record 1005.
- Weiming, X. et al., 2014. "Real-Time Signalization for an Oversaturated Intersection via Static State Feedback Control : A Switched System Approach." Journal of the Franklin Institute. Elsevier, 1–21. doi :10.1016/j.jfranklin.2014.09.017.
- Yi Hu, Thomas, P. & Stonier, R.J., 2007. Traffic signal control using fuzzy logic and evolutionary algorithms. 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/cec.2007.4424689>.
- Yi, S-H, et al., 2014. Modular Design of Urban Traffic-Light Control Systems Based on Synchronized Timed Petri Nets. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 15(2), pp.530–539. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/tits.2013.2283034>.
- Young, C.P. 1988. A relationship between vehicle detector occupancy and delay at signal controlled junctions, Traffic Engineering and Control, 29 (3), pp. 31-134.
- Zhao, X. & Chen, Y., 2003 Traffic light control method for a single intersection based on hybrid systems. Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/itsc.2003.1252657>.

# Annexe A

*« chaque début a une fin »*

---

*« Citation »*

# Annexe A

## A.1 Tutorial PHAVer

Dans ce Annexe nous décrivons le logiciel PHAVer, un outil d'analyse des systèmes hybrides développé par Goran Frehse, du laboratoire de Grenoble, France . Au début nous discuterons des différences entre celui-ci et l'outil HyTech développé à l'université Berkeley aux États-Unis. Puis nous nous intéresserons plus à l'outil PHAVer. Nous allons montrer comment faire le calcul des espaces atteignables des automates hybrides, avec application pour le automates hybride rectangulaire qui nous concernent. Nous présenterons aussi comment l'installer, ses commandes, ses versions et ses outils annexes.

### A.1.1 HyTech

le logiciel **HyTech** est un instrument pour l'analyse automate des systèmes embedded. Il est utilisable dans le dessin des systèmes embedded en vérifiant non seulement les spécifications du système, mais aussi en faisant analyse paramétrique. Il travaille avec des automates hybrides linéaires. L'entrée de HyTech est représenté par deux parts : la description du système et commandes d'analyse. Le langage d'analyse permet d'écrire des programmes pour calculer l'atteignabilité du système ou bien pour détecter ses erreurs .

### A.1.2 PHAVer

Afin de décrire l'automate hybride, PHAVer prévoit une syntaxe particulière pour le décrire textuellement. Son auteur, a essayé de le faire autant "user friendly" que possible, en gardant le parser simple. La syntaxe a emprunté extensivement depuis les créateurs de Hy-

Tech (TAH96) puisque leur langage est intuitivement compréhensible. La section suivante décrit la syntaxe de PHAVer, version 0.35 [Frehse, 2006] en représentant les automates, les localités/états, relations, etc. et aussi quelques descriptions concises des commandes pour faire l'analyse de l'automate.

La description d'un automate peut être faite à l'aide des opérants suivants :

### 1. Identificateurs

un identificateur est une lettre plus n'importe quelle combinaison de lettres, chiffres et caractères jointre les identificateurs des localités appartenant aux automates composés. Un nombre peut-être donné dans un format virgule mobile, e, g, 3,14 ou  $6,626e^{-34}$  ou comme une fonction, e, g, 9/5. Notez que les nombres sont représentés comme des rationnels exacts et aucune conversion vers le format mobile binaire n'est faite.

### 2. Constantes

Les constantes sont définies de la manière identificateur := expression, ou expression est n'importe quelle combinaison d'expressions, identificateurs et nombres avec +, -, /, \*, (.).

### 3. Structure de données

Il y a quatre types de données qui peuvent être assignées au identificateurs : formules linéaires, ensembles d'états symboliques, relations symboliques et automates.

#### — Formules linéaires

Une expression linéaire est spécifiée sur une collection arbitraire de variables, nombres et constantes qui peuvent être combinés en utilisant +, -, /, \*, (, ), tant qu'elle produit une expression linéaire sur ses variables .

#### — Ensemble d'états symboliques

Un état symbolique est une combinaison d'un nom d'une location et une formule linéaire, unies par , e.g. *start* &  $x > 0y == 0$ . Un ensemble d'états symboliques d'un automate *aut* est assigné à une variable dans la forme identificateur = *aut.ensemble d'états symboliques*

#### — Relations symboliques

Elles sont obtenues par les algorithmes de relation de simulation.

#### — Automates Il vont être traité en ce qui suit.

Pour déclare un automate il y a plusieurs aspects à considérer [Fre06]. On va les expliquer à travers un exemple :

#### — Initialisation

```
automaton aut
    contr_var: var ident,var ident,...;
    input_var: var ident,var ident,...;
    parameter: var ident,var ident,...;
    synclabs: lab_ident,lab_ident,...;
    loc loc_ident: while invariant wait {derivee};
        when guard sync label_ident do {trans_rel} goto loc_ident;
        when guard sync label_ident goto loc_ident;
        while ...
    initially: initial_states;
end
```

L'automate est déclaré en haut de la description, à l'aide du mot `automaton`. La dernière ligne de l'automate doit être `end`, ce qui signifie que ce qui se trouve entre ces deux mots clés constitue un seul automate. Avant la dernière ligne on doit aussi préciser l'état initial de l'automate avec l'instruction initiale de l'automate avec l'instruction `initially`. L'état initial est caractérisé par le sommet et les valeurs initiales des variables.

#### — Variables

Toutes les variables doivent être précisées justement après la définition de l'automate, en commençant sur la deuxième ligne, à l'aide des mots **`state_var`** (les versions du logiciel 0.2.2 et 0.33) ou bien **`contr_var`** depuis la version 0.35. Il y a aussi l'argument **`input_var`** qui désigne les entrées dans le système.

#### — Sommets

La déclaration des sommets est effectuée par l'instruction `Loc`. L'invariant et la garde sont des formules linéaires entre les variables d'état et d'entrée et les paramètres. La définition de la dérivée dépend de la dynamique :

pour une dynamique linéaire, c'est une formule linéaire convexe entre les variables d'état.

E.g.,  $0 \leq \dot{x} \wedge \dot{x} < 1$  pour  $x \in [0, 1]$

Pour une dynamique affine, c'est une formule linéaire convexe entre les variables et entre leurs dérivées. E.g,  $\dot{x} == -2 * x$  pour  $(\dot{x} = -2x)$

#### — Transitions

Une transition est spécifiée par la déclaration **`when...goto`**. On doit avoir toujours une étiquette de synchronisation associée à la transition. Une formule linéaire **`trans_rel`** spécifié la relation de saut après une déclaration **`do`**. les variables d'états qui ne sont pas changés par la transition doivent être spécifiés explicite-

ment dans la relation de saut, e.g.  $\dot{x} == x\dot{y} == y$ . la mise à 0 d'une variable sera défini par  $\dot{z} == 0$ .

### A.1.2.1 Installation

Le logiciel PHAVer est téléchargeable à l'adresse <http://www.cs.ru.nl/goranf/>. Il y a deux variantes disponible parce qu'il peut être utilisé sous deux systèmes d'exploitations : Linux et Windows. Pour la variante Windows, on doit installer aussi un émulateur de Linux, qui s'appelle Cygwin. Il est téléchargeable sur Internet.

**Remarque2** : Il est nécessaire que les scripts soient dans le même dossier que l'application PHAVer.

### A.1.2.2 Outils annexes

Pour construire des graphes bidimensionnels sous Linux on peut utiliser la commande `graph` du progiciel `plotutils`, disponible à <http://www.gnu.org/software/plotutils/>. Sous Windows /Cygwin il existe un script Matlab, disponible à <http://www.cs.ru.nl/goranf/>. Pour obtenir la mémoire utilisée pendant le calcul des états atteignables avec PHAVer on utilise `memtime`, un progiciel sous Linux, disponible à <http://www.update.uu.se/johanb/mmtime/>.

### A.1.2.3 Commandes pour description et simulation

Pour les besoins de notre projet, les commandes suivantes sont d'intérêt. Pour plus de détails le guide de l'utilisation PHAVer est [Fre06].

- **&** : Les automates sont composés par l'ampersand, e.g `compAut = autaut2`.
- **.réachable** :calcul l'ensemble des états qui sont atteignables dans l'automate en partant depuis les états initiales et en faisant une analyse en avant.
- **.print('fichier',arg)** :écrit une représentation de l'automate dans le fichier 'fichier';la variable dénote le format :arg -0(textuellement), 1(séquence de formules linéaire),2(séquence de vertices, utilisable pour construire des graphes).
- **.reverse** : Inverse la causalité dans l'automate; utilisable pour implémenter l'atteignabilité en arrière, en inversant l'automate et puis en faisant de nouveau l'analyse en avant.
- **.initial\_states** : remplace les états initiales de l'automate.
- **.intersection\_assign** : construit l'intersection de deux régions.

- **.difference\_assign** : fait la différence entre deux régions.

### A.1.3 L'implémentation de notre modèle AHR sous PHAVer

Script automate.pha

**Paramètres du système :**

$C1 := 25; C2 := 20; F1 := 0.36; F2 := 0.45; F3 := 0.39; F4 := 0.45; x110 := 5; x210 := 5; to := 5; tg1 := 20; tg2 := 20; tr1 := 20;$

**Définition de l'automate hybride :**

**state\_var** :  $x11, x21, t1, t2;$

**synclabs** :  $z1, z1p, z1pp, z12, z13, z2, z2p, z2pp, z3, z4, a, b, b1, b2, b22, b23, c, d;$

— **loc S1 :**

while  $x11 \leq C1 \& x21 \leq C2 \& x11 \geq 0 \& x21 \geq 0$

wait  $x11' == F1 - F2 \& x21' == F3 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

when  $t2 \geq to$  sync  $z1$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S2;

when  $x11 == 0$  sync  $z1$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S1p;

when  $x21 == C2$  sync  $z1$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S1pp

— **loc S1pp :**

while true wait  $x11' == F1 - F2 \& x21' == 0 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

when  $t2 \geq to$  sync  $z1pp$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S2;

— **loc S1p :**

while true wait  $x11' == 0 \& x21' == F3 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

when  $t2 \geq to$  sync  $z1p$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S2;

— **loc S2 :**

while  $x11 \leq C1 \& x21 \leq C2 \& x11 \geq 0 \& x21 \geq 0$

wait  $x11' == F1 - F2 \& x21' == F3 - F4 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

when  $t1 \geq tg1$  sync  $z2$  do  $t1' == 0 \& t2' == t2 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S3;

when  $x11 == 0$  sync  $z2$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S2p;

when  $x21 == 0$  sync  $z2$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S2pp;

— **loc S2p :**

while true wait  $x11' == 0 \& x21' == F3 - F4 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

when  $t1 \geq tg1$  sync  $z2p$  do  $t1' == t1 \& t2' == 0 \& x11' == x11 \& x21' == x21$  goto S3;

— **loc S2pp :**

while true wait  $x11' == F1 - F2 \& x21' == 0 \& t1' == 1 \& t2' == 1$

```

when t1 >= tg1 sync z2pP do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S3;

— loc S3 :
while x11 <= C1&x21 <= C2&x11 >= 0&x21 >= 0
wait x11' == F1&x21' == F3 - F4&t1' == 1&t2' == 1
when t2 >= tg2 sync z3 do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S4;
when x11 == C1 sync z31 do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S3p;
when x21 == 0 sync z22 do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S2pp;

— loc S3p :
while true wait x11' == 0&x21' == F3 - F4&t1' == 1&t2' == 1
when t1 >= tg2 sync z2p do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S4;

— loc S3pp :
while true wait x11' == F1 - F2&x21' == 0&t1' == 1&t2' == 1
when t1 >= tg2 sync z3pp do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S4;

— loc S4 :
while x11 <= C1&x21 <= C2&x11 >= 0&x21 >= 0
wait x11' == F1&x21' == F3&t1' == 1&t2' == 1

when t1 >= 20 sync z4 do t1' == 0&t2' == 0&m5' == m5&m6' == m6 goto S1;
when x11 == C1 sync z41 do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S4p;
when x21 == C2 sync z41 do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x41 goto S4pp;

— loc S4p :
while true wait x11' == 0&x21' == F0&t1' == 1&t2' == 1
when t1 >= tr1 sync z4p do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S1;

— loc S4pp :
while true wait x11' == F1&x21' == 0&t1' == 1&t2' == 1
when t1 >= tg2 sync z4pp do t1' == t1&t2' == 0&x11' == x11&x21' == x21 goto S1;
initially S1 & x11 == x110&x21 == x210&t1 == 0&t2 == 0;
end
echo "analyse en avant";
analyse_avant = trafficnetowrk.reachable;
analyse_avant.print;
analyse_avant.print("c :/phaver/case1.txt", 0);

```

## A.2 Présentation du logiciel Synchro

**Synchro** est un logiciel commercialiser pour de modélisation, d'analyse et optimisation des temps de feux de trafic dans déferent configuration de système de transport urbain, ce logiciel est développé par la société américaine **Trafficware**. Il prend en charge « Highway Capacity Manual's methodologyde » (HCM 2000, 2010) pour la modélisation et l'optimisation des temps de feux de trafic dans les intersections, les réseaux artériels et les réseaux a grande échèle. les caractéristiques principales de synchro comprennent :

- **Analyse des capacités** : Synchro fournir une mise en œuvre une implémentation complète du chapitre 16 de (HCM 200).
- **Coordination** : synchro vous permet de générer rapidement le plan des feux de synchronisation optimale pour minimiser les retards.
- **Le diagramme temps-distance** : Synchro est colorée et informatif sur le diagramme temps-distance. Les durées de phases et le décalage peuvent changer directement sur le diagramme.
- **Intégration** avec SimTraffic, CORSIM and HCS :

### A.2.1 Synchro ® Studio suite

Synchro ® Studio suite est un logiciels qui comprend :

- **Synchro** : est un simulateur macroscopique, généralement utiliser pour analyse et optimisation des feux de signalisations dans les intersections (longueur de cycle, offset( décalage) , temps de vert et des phases), Il prend en charge HCM (2000, 2010) pour l'intersections a feux
- **Sim-tarffic** : est un microscopique simulateur pour la simulation et animation des réseau de trafic routier
- **3D Viewer** : est une application pour visionner 3D la simulation de Sim-traffic
- **Sim-Traffic CI** : une application qui coopère avec dispositif d'interface de commande, connecté à un contrôleur pour simuler le fonctionnement du contrôleur de trafic simulé

## A.2.2 L'interface d'entrée de Synchro (version 8)

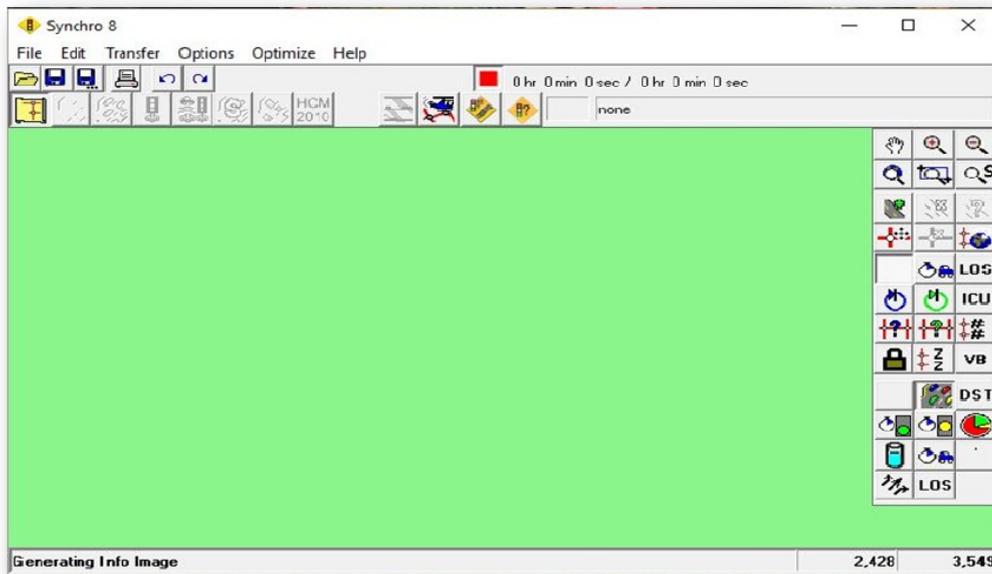


FIGURE A.1 – L'interface d'entrée de Synchro (version 8)

## A.3 Liste de publication

### A.3.1 Publications dans des Journaux

1. F. Bouriachi & S. Kechida, 2016. *Hybrid Petri Nets and Hybrid Automata for Modeling and Control of Two Adjacent Oversaturated Intersections*. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. Available at : <http://dx.doi.org/10.1007/s40313-016-0275-x>.

### A.3.2 Conférences internationales

1. Bouriachi, F. & Kechida, S., 2016. Control of large-scale urban traffic networks using hierarchical hybrid automata. 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC). Available at : <http://dx.doi.org/10.1109/icmic.2016.7804212>.
2. Bouriachi, F. & Kechida, S., 2014. Commande supervisée d'un tronçon urbain via un automate hybride rectangulaire non déterministe, Colloque International sur Le Monitoring des Systèmes Industriels, CIMSIS 2014, Marrakech - Maroc.
3. Kechida, S. & Bouriachi, F., 2014. Analyse de l'écoulement du Trafic : Application à un tronçon urbain de la ville de Guelma, Algérie, Colloque International sur le Monitoring des Systèmes Industriels, CIMSIS 2014, Marrakech, Maroc.
4. Bouriachi, F. et al., 2013. Modélisation d'un Réseau du Trafic Urbain par Automate Hybride, International Conference on Systems and Processing Information (ICSIP13), Guelma, Algeria.

### A.3.3 Conférences Nationales

1. Bouriachi, F. & Kechida, S., 2016. Simulation et analyse d'un réseau de trafic urbain : application à la ville de Guelma, 2eme journée sur Signaux et Système, 19 Juin 2016-Guelma.
2. Bouriachi, F. & Kechida, S., 2014. Control synthesis methods for traffic signal control in congested urban road. Scientific Days on laboratory JSLEA'2014. of LEA in Batna, Algeria.
3. Bouriachi, F. & Kechida, S., 2014. A Control Design By Non-Deterministic Rectangular Hybrid Automata, First scientific days JD'14, LAIG, University of Guelma.
4. Bouriachi, F. et al., 2013. Synthèse d'un contrôleur pour un tronçon routier à base d'automate hybride rectangulaire 2ème journée sur les systèmes et les signaux JSS'13, Université de 08 Mai 1945-Guelma.

5. F. Bouriachi, et al.,2013. Mesure des données du trafic avec capteur vidéo, Présenté à la 1ème Journée 2013 sur les Signaux et Systèmes, 1ème JSS'13, Le 26-06-2013, organisé par le LAIG, Guelma, Algérie.
6. Kechida, S.& Bouriachi,F. 2012. Modélisation et simulation des Systèmes Dynamiques Hybrides. Rencontre des Femmes Scientifiques Méditerranéennes "REFSCIME 2013",les 15-16 Avril 2013,Université de Skikda, Algérie
7. Bouriachi,E, et al.,2011. Surveillance des Systèmes Dynamiques Hybrides en utilisant les RRA : application à un système à deux réservoirs. Présenté à la 2ème Journée 2011 sur les Signaux et Systèmes, 2ème JSS'11, Le 12-11-2011, organisé par le LAIG, Guelma, Algérie.