

Utilisation de la conduite coopérative pour la régulation de trafic dans une intersection

Jia Wu

▶ **To cite this version:**

Jia Wu. Utilisation de la conduite coopérative pour la régulation de trafic dans une intersection. Ordinateur et société [cs.CY]. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2011. Français. NNT : 2011BELF0163 . tel-00703165

HAL Id: tel-00703165

https://theses.hal.science/tel-00703165

Submitted on 1 Jun 2012

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

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

N° d'ordre : 163 Année 2011

École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques

THÈSE

Présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Discipline : Automatique

UTILISATION DE LA CONDUITE COOPERATIVE POUR LA REGULATION DE TRAFIC DANS UNE INTERSECTION

Par

Jia WU

Soutenue le 20 Juillet 2011

Rapporteurs	El-Miloudi EL-KOURSI	Directeur de Recherche	ESTAS, Villeneuve d'Ascq, France
Examinateurs	Lionel AMODEO	Professeur	UTT, Troyes, France
	Arnaud DE LA FORTELLE	Professeur	MINES ParisTech, Paris, France
	Mourad ABED	Professeur	UVHC, Valenciennes, France
Directeur	Abdellah EL MOUDNI	Professeur	UTBM, Belfort, France
Co-directeur	AbdelJalil ABBAS-TURKI	Maître de Conférences	UTBM, Belfort, France

Laboratoire Systèmes et Transport
SeT, UTBM, site de Belfort
90010 Belfort Cedex

L'imagination est plus importante que le savoir.

\- *Albert Einstein*

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements au Professeur Abdellah EL MOUDNI, mon directeur de thèse, pour son accueil et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée. Je tiens à remercier particulièrement Monsieur Abdel-jalil ABBAS-TURKI, mon Co-directeur de thèse. Son expérience de la recherche, ses conseils, ses encouragements, et son amitié m'ont été très précieux, et m'ont permis de bien mener mon travail.

Je remercie également les membres du jury Monsieur El-Miloudi EL-KOURSI, les Professeurs Lionel AMODEO, Arnaud DE LA FORTELLE, Mourad ABED, de l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail et d'être les rapporteurs et les examinateurs de ma thèse. Il me tient tout à cœur de remercier leurs remarques pertinentes pour améliorer la qualité de cette thèse.

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel du laboratoire Systèmes et Transports pour l'amitié et l'aide qu'il m'a apportée durant la période de la thèse.

Je remercie tous les membres de ma famille qui m'ont accompagné tout au long de mes études par leur amour inconditionnel et leur soutien moral constant : merci à mes parents ; merci à mon mari et notre fille qui va venir au monde bientôt.

TABLE DES MATIERES

Introduction générale 5

Chapitre 1 . Régulation du trafic aux intersections isolées : généralités et tendances 9

Introduction 9

1.1. Intersection isolée à feux 10

1.1.1 . Boucle de régulation d'une intersection isolée à feux 11

1.1.2 . Système de signalisation 12

1.2. Systèmes de régulation usuels 14

1.2.1 . Variables du trafic 14

1.2.2 . Infrastructure de mesure 16

1.2.3 . Modèles du trafic 18

1.2.4 . Régulateurs 23

1.2.5 . Synthèse 30

1.3. Boucles de régulation émergentes 30

1.3.1 . Technologies de positionnement et de communication sans-fil 31

1.3.2 . Régulation coopérative des intersections isolées 35

1.3.3 . Synthèse 38

1.4. Conclusion 39

Chapitre 2 . Régulation coopérative d'une intersection élémentaire isolée 41

Introduction 41

2.1. Système étudié 42

2.1.1 . Nouveau système de régulation : Système du véhicule actionneur coopératif 42

2.1.2 . Nouvelle boucle de régulation 43

2.1.3 . Deux nouveaux protocoles : SVAC centralisé et SVAC décentralisé 45

2.2. Modélisation du système 47

2.2.1 . Étude du comportement des véhicules aux intersections 48

2.2.2 . Modèle RdP de l'intersection 51

2.3. Régulateur SVAC centralisé 54
2.3.1 . Algorithme de régulation 54
2.3.2 . Exemple du fonctionnement du SVAC centralisé 57
2.3.3 . Exemple d'une intersection autonome 60
2.4. Régulateur SVAC décentralisé 62
2.4.1 . Minimisation instantanée de la longueur de la file d'attente 62
2.4.2 . Algorithme de contrôle 64
2.4.3 . Exemple d'application 64
2.5. Résultats de simulation 66
2.5.1 . Environnement de simulation 67
2.5.2 . Comparaisons entre le SVAC centralisé et le SVAC décentralisé 68
2.5.3 . Impact de la prévision du trafic 70
2.5.4 . Comparaison du SVAC avec d'autres approches. 72
2.6. Conclusion 74
Chapitre 3 . Régulation coopérative d'une intersection plus complexe 77
Introduction 77
3.1. Modélisation du système 77
3.1.1 . Configuration d'une intersection à quatre branches 78
3.1.2 . Modèle RdP de l'intersection 79
3.2. Régulateur SVAC centralisé 81
3.2.1 . Méthode de la programmation dynamique 81
3.2.2 . Heuristiques 83
3.2.3 . Méthode de colonies de fourmis 86
3.2.4 . Qualité des algorithmes proposés 96
3.2.5 . Application aux véhicules conduits par l'homme 97
3.3. Régulateur SVAC décentralisé 101
3.3.1 . Minimisation instantanée de la longueur de la file d'attente 102
3.3.2 . Exemple d'application 108
3.4. Résultats de simulation 111
3.4.1 . Comparaisons entre le SVAC centralisé et le SVAC décentralisé 112

3.4.2 . Comparaisons du SVAC avec d'autres régulateurs 113
3.5. Conclusion 117
Chapitre 4 . Applications 119
Introduction 119
4.1. Application SVAC à une T-intersection réale 119
4.1.1 . Configuration d'une T-intersection 119
4.1.2 . Étude de la performance de SVAC à une T-intersection 121
4.2. Maquette du SVAC à une échelle réduite 124
4.2.1 . Configuration de la maquette 124
4.2.2 .Tests de la maquette 129
4.3. Conclusions 131
Conclusion générale 133
Bibliographie 135
Annexes 147
A.1. Modèle de poursuite : Gipps 147
A.2. Modélisation des arrivées de véhicules par le processus stochastique de Poisson 148
A.3. Algorithme de la régulation de NR1 basée sur la formula Webster 149
A.4. Algorithme de la régulation de NR2 Basée sur la longueur de la file d'attente de véhicules 150
A.5. Régulation des véhicules autonomes 152
A.6. Présentation du matériel du marquette SVAC 154
Liste des figures 157
Liste des tableaux 161
Liste des acronymes 163

INTRODUCTION GENERALE

Les intersections dans les réseaux de transport constituent le lieu où se décide le partage de l'infrastructure entre les différentes entités mobiles. En effet, la régulation dans ces lieux interdit temporairement ou autorise l'accès des entités mobiles aux infrastructures pour continuer leurs trajets. Le problème de la régulation des intersections se pose dans tous les réseaux qui supportent au moins deux itinéraires qui se croisent. Les intersections sont des lieux qui méritent une attention particulière car elles sont accidentogènes et perturbent les déplacements. Elles soulèvent des problématiques non seulement d'efficacité et de sécurité mais aussi de pollution et de consommation d'énergie.

Actuellement, la régulation des intersections est différente selon le lieu et les entités mobiles qui se croisent. En ville, l'augmentation de la demande du trafic a exigé le recours au découpage temporel de l'accès aux croisements, à travers la signalisation tricolore. Ailleurs, la conduite à vue reste le moyen principal pour permettre aux entités mobiles de gérer le conflit. Qu'il soit humain ou automate, la perception de l'environnement responsabilise l'agent de conduite pour éviter les collisions en respectant un protocole donné souvent décliné sous la forme de priorités. Cependant, la visibilité de l'agent de conduite est limitée, ce qui impose des ralentissements, voire des arrêts, et des difficultés d'insertion en toute sécurité.

L'émergence de la communication sans-fil et du positionnement permet d'étendre le champ de visibilité de l'agent de conduite. Le déploiement le plus basique consiste à fournir l'information sur l'ensemble des entités mobiles présentes dans l'environnement de conduite. Une approche plus élaborée consiste à lui indiquer l'action à entreprendre pour traverser l'intersection. Cette approche a fait naître le concept de l'intersection autonome. Un concept séduisant qui permet aux agents de conduite de négocier l'accès à l'espace conflictuel soit d'une manière décentralisée [Grünewald, Rust et al. 2006] soit à travers un régulateur de l'intersection [Li et Fei-Yue 2006; Mehani et de La Fortelle 2007; Dresner et Stone 2008b].

Bien que le concept date de 2004, très peu de réalisations ont été faites dans ce sens. Il reste jusqu'au jour d'aujourd'hui un concept purement théorique. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce fait. Néanmoins, trois nous paraissent relativement importantes :

- Le protocole n'aborde pas les questions de sécurité ;
- Le protocole proposé est limité aux seuls véhicules autonomes ;
- La politique de régulation est basée principalement sur le premier arrivé premier servi (PAPS).

Le fait de s'appuyer sur PAPS limite les potentialités d'augmentation de la capacité des intersections et remet en cause la flexibilité que peut apporter un tel concept en termes de politiques d'insertion des véhicules. En effet, le concept de l'intersection autonome suppose la personnalisation de la signalisation, ce qui théoriquement ouvre la possibilité de déployer une multitude de politiques pour organiser le trafic aux intersections. Ainsi est-il nécessaire de dépasser le cadre du PAPS, pour chercher d'autres politiques capables de convaincre de leurs efficacités face aux problématiques de fluidité du trafic. En effet, il ne serait pas envisageable de remplacer les feux tricolores si le concept n'apportait pas un gain de capacité au niveau des intersections. Ceci est d'autant plus vrai que les gains en termes de sécurité ne sont pas prouvés à l'heure actuelle.

En outre, limiter les investigations seulement aux véhicules autonomes rend le concept dépendant du déploiement de ce type de véhicules dans nos villes. Bien que l'automatisation des actions de conduite soit souhaitable, il est préférable de ne pas lier les deux perspectives, à

savoir les véhicules autonomes et les intersections flexibles, à haute capacité. En effet, le besoin d'augmentation de la capacité des infrastructures est urgent pour face à la demande du trafic. Il serait donc intéressant de généraliser le concept à des véhicules ordinaires en se basant sur la signalisation à bord.

Dans ce mémoire de thèse nous nous intéressons au déploiement du concept d'une régulation qui traite des véhicules réellement présents avec une signalisation personnalisée pour améliorer la fluidité de la circulation. Bien qu'inspirés initialement de l'intersection autonome, nous nous sommes fixés comme cible de l'adapter aux véhicules ordinaires, ce qui nous pousse à proposer une nouvelle boucle de régulation basée sur les technologies de la communication sans-fil et du positionnement. L'objectif de cette thèse est donc de traiter du problème de la fluidité du trafic dans une intersection isolée soumise à la nouvelle boucle de régulation proposée.

Cet objectif est encouragé par les développements technologiques actuels. Les technologies sans-fil avec les systèmes de positionnement ont reçu une grande attention au cours de la dernière décennie. Ils offrent un énorme potentiel pour renforcer le lien entre les véhicules (les conducteurs), les conditions de circulation et la boucle de régulation. Un nouveau domaine de recherche - la conduite coopérative, a émergé. La conduite coopérative a été introduite au début des années 90 pour le changement de voie et la fusion du peloton. Profitant de cette tendance, nous nous intéressons à traiter les véhicules d'une manière individuelle au niveau des intersections, au lieu des méthodes actuelles qui considèrent le trafic comme un flot. Ainsi, les données sur le trafic pourraient être plus précises et la régulation optimisée en fonction.

Cependant, un nouveau concept de la régulation du trafic soulève plusieurs problèmes. D'abord, la principale difficulté est la complexité inhérente au trafic. Pour s'affranchir cette difficulté, nous avons besoin d'un modèle mesoscopique qui permet de décrire le comportement des véhicules au sein des intersections en utilisant de nouvelles données du système. Nous faisons appel à la modélisation par les réseaux de Petri (RdP). Le choix des réseaux de Petri est lié au fait que nous devons considérer chaque véhicule individuellement, ce qui est en faveur de la discrétisation des évènements observés et communiqués à l'environnement. Ensuite, en se basant sur ce modèle, nous nous affranchissons du principe du partage temporel de l'espace de l'intersection afin d'améliorer la fluidité du trafic. A ce niveau, se pose le problème de l'approche permettant d'optimiser l'attribution de l'espace de l'intersection en fonction des données transmises par les véhicules. Dans ce mémoire, nous visons à aborder les deux problèmes, à savoir fournir le modèle et proposer des solutions pour améliorer la fluidité des intersections isolées.

Ce mémoire est organisé comme suit : Dans le premier chapitre, nous rappelons le vocabulaire de la régulation du trafic au niveau des intersections. Après nous donnons un bref aperçu sur les technologies de la communication sans-fil et du positionnement et leurs rôles supposés dans la régulation des intersections. Dans le deuxième chapitre, nous présentons un nouveau système de régulation au sein d'une intersection élémentaire. Ensuite, un modèle RdP est développé pour décrire le comportement de ce système. Deux protocoles du système selon deux objectifs différents d'optimisation sont présentés : l'un est basé sur les techniques de l'optimisation combinatoire, et le deuxième est essentiellement basé sur l'analyse du modèle RdP. L'évaluation des performances des systèmes proposés est effectuée à partir des comparaisons avec d'autres approches de la littérature. La simulation microscopique permet de dégager les performances des différentes approches testées.

Le troisième chapitre étend les résultats obtenus pour appliquer le système à une intersection plus complexe. Cette application met en évidence le problème de la complexité algorithmique. Nous étendons les protocoles de régulation afin qu'ils puissent s'adapter à une demande élevée du trafic. Pour ce faire, nous faisons appel aux méthodes heuristiques. Enfin, dans le dernier chapitre, nous mettons en pratique le système à travers des données réelles. En outre, une

maquette basée sur les robots NXT est construite pour discuter de la faisabilité du système dans des conditions proches de la réalité.

Chapitre 1 . REGULATION DU TRAFIC AUX INTERSECTIONS ISOLEES : GENERALITES ET TENDANCES

Introduction

Le transport a toujours été un élément déterminent de la vie urbaine et de son développement économique. A partir de la seconde moitié du siècle dernier, nous avons assisté au phénomène de la congestion routière qui a attiré une attention particulière en raison de l'augmentation rapide du nombre de véhicules et de la demande dans tous les modes de transport. La congestion apparaît lorsqu'un nombre important de véhicules tentent d'utiliser une même infrastructure. Lorsque les capacités de l'infrastructure sont pleinement utilisées nous assistons à un ralentissement de la circulation. Lorsque la demande du trafic dépasse les capacités de l'infrastructure, la congestion entraîne une dégradation importante de la qualité de la conduite, une augmentation considérable de la pollution environnementale, une sécurité réduite et des files d'attente avec des retards excessifs. Dans le milieu urbain, les congestions sont amplifiées lorsque plusieurs flux de véhicules tentent d'accéder à un même lieu. Les intersections font partie de ces lieux disputés par plusieurs flux conflictuels. Elles se trouvent ainsi au centre des préoccupations urbaines. Dans le passé, la signalisation tricolore a joué un rôle considérable dans l'augmentation des capacités des intersections.

Mais, aujourd'hui, les feux tricolores ne permettent plus de résorber le trafic incessamment croissant. D'autre part, les crises énergétiques, l'émergence des préoccupations environnementales, les limites des ressources économiques ralentissent l'expansion de l'infrastructure routière. Ainsi, la situation actuelle du trafic dans nos villes témoigne d'un besoin de renouvellement de nos approches de gestion du transport en général. Ceci a conduit de nombreux chercheurs à réfléchir à une série de stratégies déployées sur plusieurs échelles allant du développement des systèmes d'information aux réflexions autour de nouveaux systèmes de mobilité basés sur l'émergence de véhicules propres et intelligents. Ces travaux de recherches sont encouragés par le développement rapide des technologies de l'information et de la communication sans-fil.

Malgré les évolutions futures que connaîtront les systèmes de mobilité urbaine, les intersections resteront au centre des préoccupations de demain. En effet, il faut noter que non seulement c'est à leur niveau que se décidera le partage de l'infrastructure urbaine, mais surtout les systèmes de mobilité seront enclins à se croiser et imposeront ainsi une exploitation de haut niveau des intersections, à l'image du niveau des moyens technologiques qui seront embarqués dans les véhicules ou qui seront à la portée des conducteurs ou des usagers. Cette translation du rôle central de l'intersection a convaincu plusieurs chercheurs, ce qui les conduit actuellement à examiner les possibilités d'amélioration de la régulation au niveau de ces nœuds stratégiques. Le déploiement des technologies sans-fil et de positionnement au niveau des intersections apparaît alors comme une issue incontestable pour devancer les performances actuelles des feux tricolores. Comme dans le passé de l'ingénierie du trafic, l'exercice consistera à réussir le pari à l'échelle d'une intersection isolée. En effet, les gains de capacité réalisés au niveau d'une intersection isolée profiteront à une démarche globale.

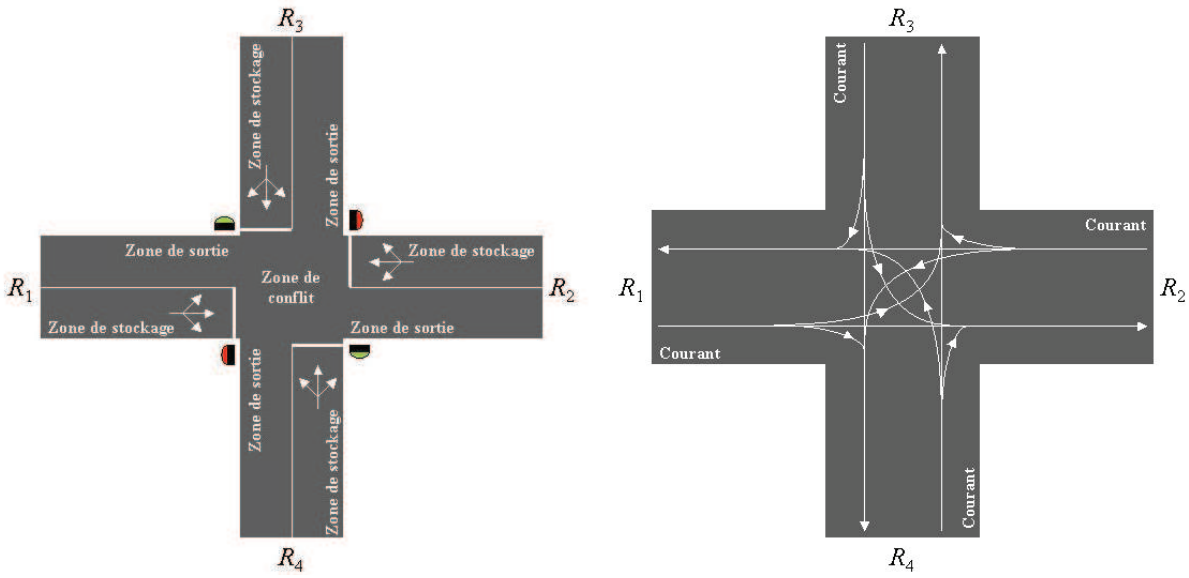
Ce chapitre vise à mettre en lumière les nouvelles tendances de la régulation du trafic au niveau des intersections, en soulignant les différences entre les nouveaux systèmes imaginés et le système actuel. Il décrit le système de signalisation basé sur les feux tricolores au niveau d'une intersection isolée et discute les différentes évolutions de ce système trouvées dans la littérature. Il est organisé de la manière suivante : Il décrit d'abord une intersection urbaine à feux, afin d'introduire la terminologie utilisée et définir quelques concepts. Ensuite, il présente les

différentes stratégies existantes de régulation au niveau d'une intersection isolée. Enfin, il met en exergue les réflexions actuelles autour de la régulation future des intersections, afin d'améliorer la fluidité du trafic.

1.1. Intersection isolée à feux

Une intersection est le lieu de croisement d'au moins deux routes (voir Figure 1- 1). Une route est caractérisée par sa longueur, son nombre de voies, ainsi que par les sens de circulation. Un ***mouvement*** est défini par son origine et sa destination. Un ***courant*** de mobile est l'ensemble des mouvements de véhicules qui proviennent de la même branche d'accès, à savoir la même origine. Ils sont admis simultanément sans conflit. Certaines voies peuvent être dédiées à un mouvement particulier du courant, comme par exemple les mouvements de tourne-à-gauche. Une intersection peut revêtir plusieurs schémas relatifs à la géométrie de l'infrastructure et aux règles de franchissement. Cependant, dans chaque intersection nous pouvons identifier trois zones fonctionnelles :

- **Zone de conflit** : Il s'agit de l'espace de croisement des routes. Autrement dit, c'est la ressource critique partagée par tous les véhicules qui traversent l'intersection ;
- **Zone de stockage** : En amont de la zone de conflit, elle est l'entrée empruntée par les véhicules ;
- **Zone de sortie** : En aval de la zone de conflit, elle permet le soulagement de cette zone.



(a) 4 zones de stockage, 4 zones de sortie et une zone de conflit

(b) 4 courants et 12 mouvements de véhicules

Figure 1- 1. Intersection à quatre branches avec mouvement tourne-à-gauche à priorité à droite (sans déplacements pédestres)

Un *point conflictuel* résulte de la rencontre, en un même lieu, d'au moins deux mouvements de mobiles avec un angle non nul. La zone de conflit d'une intersection quelconque est constituée de l'ensemble des points conflictuels. Certains trouvent une solution dans le respect du code de la route. Cependant, ils doivent être examinés avec soin en fonction de la visibilité et de l'importance respective des mouvements (Cf. la réglementation en vigueur dans [Anonyme 1991; Barbeau et Fève 2002]. D'autres doivent être systématiquement éliminés dès lors que l'on implante une ***signalisation lumineuse tricolore verticale***. Cette signalisation est située à la frontière de chaque zone de stockage et de la zone de conflit. Elle a pour principe de découper le

temps d'utilisation de la zone de conflit pour les différents groupes de courants ou mouvements antagonistes. En conséquence, elle supprime, à travers un découpage temporel, certains points conflictuels, ce qui a pour premier objectif de contribuer à l'amélioration de la ***sécurité*** du croisement.

Le choix de la durée de chaque état des feux et la synchronisation de ceux-ci entre eux interviennent dans la gestion de l'écoulement du trafic. Celle-ci peut avoir des orientations multiples en fonction des choix politiques de la ville et des agences compétentes impliquées [Anonyme 2004]. A titre d'exemple, la politique de régulation peut favoriser les modes doux, les transports collectifs ou des corridors particuliers. Cependant, ces choix doivent correspondre aux caractéristiques locales des déplacements. En d'autres termes, il n'est pas souhaitable que la régulation mise en place engendre des perturbations (congestion), ce qui place le critère d'***efficacité***, à savoir la *fluidité du trafic*, en deuxième position.

La gestion de l'écoulement du trafic s'effectue à travers la ***boucle de régulation de l'intersection*** (voir Figure 1- 2)**.** Cette boucle est constituée de deux parties qui sont l'intersection et le ***système de feux de signalisation*** associé. L'intersection est caractérisée par sa géométrie, les mobiles qui s'y déplacent, les mouvements autorisés et les volumes correspondants. Le système de feux de signalisation associé est choisi en fonction de la politique de régulation de la ville, tout en assurant la sécurité et la fluidité du trafic.

1.1.1. Boucle de régulation d'une intersection isolée à feux

Le principe des feux actuels est né du dispositif employé par le policier Lester Wire, en 1912 à Salt Lake City aux Etats-Unis [A. Klein, K.Mills et al. 2006]. A l'époque les feux étaient bicolores, à savoir verts et rouges à l'image des premiers feux déployés pour la régulation du trafic ferroviaires. Depuis cette date, les feux ont évolué pour s'adapter à la demande croissante du trafic et au développement des mobiles qui traversent l'intersection. En effet, la signalisation bicolore a vite rencontré des problèmes de sécurité, cédant sa place à la signalisation tricolore. D'autres modifications ont été apportées, afin de répondre à l'émergence des véhicules motorisés dans l'espace urbain. Les chercheurs de l'époque ont contribué à l'amélioration rapide du système de feux de signalisation qui a très tôt (avant 1938) connu une configuration similaire à celle que nous avons aujourd'hui [FHWA 2005]. En effet, l'article de Tyack daté de 1938 [Tyack 1938] témoigne de l'implémentation d'une boucle de régulation similaire à celle dont nous disposons actuellement (voir Figure 1- 2).

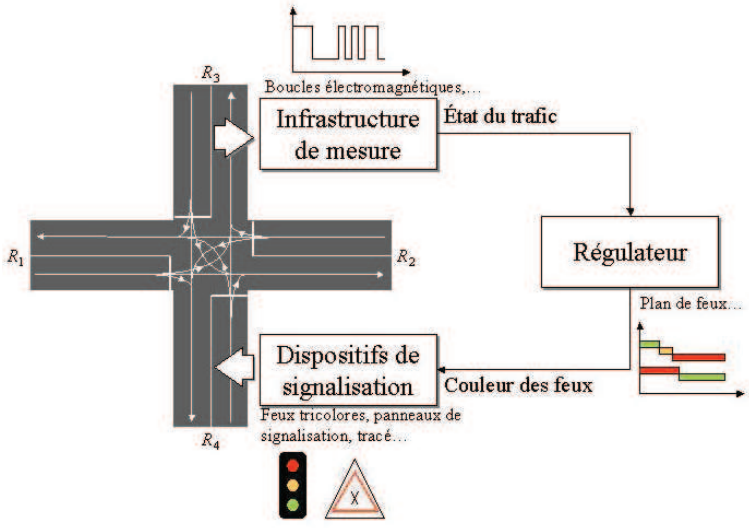


Figure 1- 2. Boucle de régulation d'une intersection isolée

Le système de feux de signalisation associé à une intersection urbaine est généralement un système complexe qui ne se limite pas aux signalisations verticales et horizontaux visibles par les conducteurs. En effet, des instruments de mesure, des postes de contrôles, un central, des liaisons filaires ou GPRS, etc. sont souvent requis pour assurer le fonctionnement de la régulation. Si nous limitons notre étude à une intersection isolée, nous pouvons au moins identifier trois éléments qui composent son système de feux de signalisation. L'intégration de ces trois éléments à une intersection constitue la boucle de régulation du trafic à son niveau. Ces éléments sont :

- **Les dispositifs de signalisation** : Il s'agit de l'ensemble des signaux verticaux et horizontaux transmis aux conducteurs pour assurer la sécurité de passage des mobiles. Ils visent à éviter la rencontre des mouvements conflictuels. Dans le cadre d'une intersection isolée à feux, le système de signalisation vertical se distingue par la présence de feux de signalisation. Par la suite, nous limiterons notre étude aux feux tricolores ;
- **Les infrastructures de mesure** : Ils reflètent l'état du trafic à travers ses différentes grandeurs. Ces grandeurs sont mesurées par des capteurs installés au niveau de l'infrastructure ;
- **Le régulateur** : Il est le cerveau de la boucle de régulation. Il précise en temps réel les stratégies de régulation, en fonction des données issues de l'infrastructure de mesure, afin d'atteindre des objectifs bien précis, comme minimiser la longueur des files d'attente, le temps d'attente des véhicules, etc.

A partir de cette description, apparaissent deux systèmes distincts. Le premier est le ***système de signalisation*** qui, en fonction des volumes prévus du trafic et de la géométrie de l'intersection, a pour objectif principal la sécurité. Ce système est constitué de l'ensemble des dispositifs de signalisation et peut parfois faire appel à l'infrastructure de mesure pour la détection d'incidents [Barney 2003]. Le deuxième est le ***système de régulation*** qui dépend du système de signalisation mis en place et vise généralement à garantir la fluidité du trafic. Ce système regroupe le régulateur et les infrastructures de mesure. Dans la bibliographie, à l'exception de quelques travaux, chaque système, voire chaque élément de la boucle de régulation est traité séparément. La majorité des efforts pour améliorer la fluidité du trafic se concentre sur le système de régulation. Ces travaux partent des hypothèses du système de signalisation décrit dans la partie suivante.

1.1.2. Système de signalisation

Le système de signalisation est la partie visible du système étudié. Il est constitué entre autres des feux tricolores installés au niveau de chaque accès autorisé à la zone de conflit. Chaque feu tricolore est ainsi lisible à partir de tous les véhicules se trouvant dans une zone de stockage de l'intersection. Un feu tricolore est caractérisé par la couleur de la signalisation lumineuse qui est verte, jaune ou rouge. La signification de chaque couleur est comme suit :

- **Vert** : Les feux de signalisation verts autorisent le passage des véhicules ;
- **Jaune** : Tout conducteur doit marquer l'arrêt dans la mesure du possible devant un feu de signalisation jaune fixe car il annonce un feu rouge imminent ;
- **Rouge** : Les feux rouges interdisent l'accès à la zone de conflit.

Rappelons quelques concepts essentiels de la signalisation à feux. La durée pendant laquelle un ou plusieurs courants sont admis simultanément constitue une ***phase***. L'enchaînement des différentes phases constitue un ***cycle*** des feux. Le temps de cycle désigne la durée entre deux

passages successifs de l'ensemble des feux d'une intersection par la même phase, dans le cas où les phases ne seraient pas escamotées. Le découpage en phases dépend des mouvements conflictuels ou gênants. Il s'efforce de supprimer ou de minimiser les conflits en tenant compte de la sécurité et de la fluidité.

Le ***vert effectif*** est la somme du temps de vert réel et du temps de jaune. Le temps de ***vert utile*** se définit en retranchant du vert effectif le temps perdu, à savoir la somme du temps perdu au début du vert, c'est à dire au démarrage, et du temps perdu en fin de phase. Les temps perdus par phase se situent en moyenne autour de 8 secondes [Hall 1999]. Une telle valeur doit être pondérée au cas par cas, selon les caractéristiques propres de chaque intersection. Le ***rouge utile*** est la différence entre la durée du cycle et celle du vert utile.

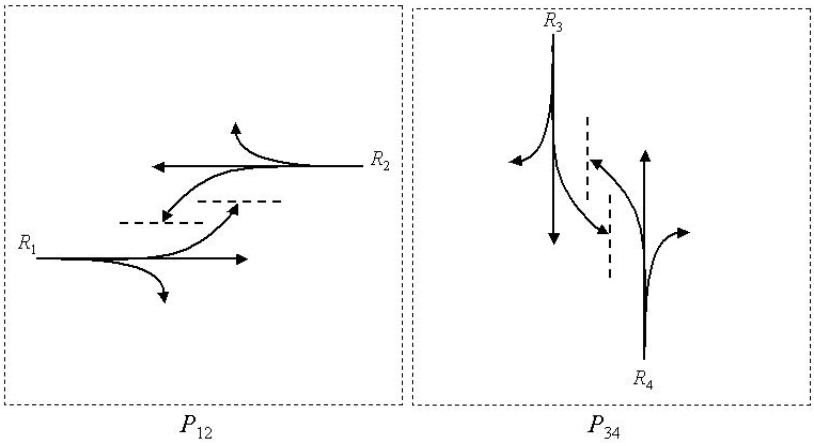


Figure 1- 3. Exemple de découpage en phase d'une intersection à quatre branches

Concernant l'intersection montrée dans la Figure 1- 1, on constate qu'il y a deux paires de courants en conflit, à savoir la paire de courants provenant des rues R_1 et R_2 et la paire de courants provenant des rues R_3 et R_4. En supposant que les mouvements dominants sont les mouvements directs (aller tout droit) et que les mouvements de tourne-à-gauche sont soumis à la priorité à droite, nous pouvons découper le cycle en 2 phases, i.e. P_{12} et P_{34}, comme la Figure 1- 3 l'indique.

Supposons les durées des phases P_{12} et P_{34} identiques et que la séquence des phases est fixe. Les feux installés aux rues R_1 et R_2 sont d'abord verts, puis rouge pour que les feux aux rues R_3 et R_4 deviennent à leur tour verts ; et ainsi de suite. Les deux phases se succèdent, constituant un cycle. Le plan des feux pour cette intersection est illustré dans la Figure 1- 4. Pour des raisons de sécurité, à la fin de chaque phase, l'ensemble des feux de l'intersection est maintenu au rouge pendant une certaine durée, appelée ***rouge intégral***. Le rouge intégral permet de vider la zone de conflit avant d'attribuer le vert à un courant conflictuel. La manière de gérer les séquences et les durées des phases constitue la stratégie de régulation de l'intersection. La stratégie de régulation dépend de l'état du trafic estimé grâce aux mesures réalisées. Ainsi, la fluidité du trafic est généralement la mission du système de régulation qui décide de la durée de chaque phase et de la séquence des phases.

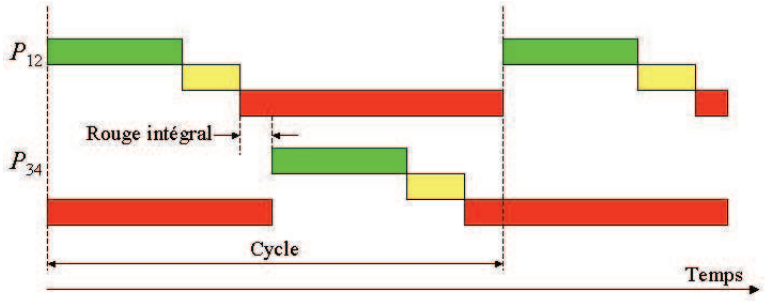


Figure 1- 4. Exemple de séquence de phases

1.2. Systèmes de régulation usuels

Rappelons que le système de régulation regroupe les infrastructures de mesure et le régulateur. Lorsque le trafic est dense, en heure de pointe, la fluidité du trafic (efficacité) devient le critère prééminent. Ce critère consiste à réduire les temps de parcours ou le retard moyen par véhicule. D'autres interprétations peuvent y être associées comme la réduction des longueurs des files d'attente, et la diminution du nombre d'arrêts. Cependant, en général, ces critères sont liés. Par exemple, dans [Wunderlich, Cuibi et al. 2008], les auteurs prouvent que réduire les temps de parcours revient à minimiser la longueur des files d'attente et le retard moyen par véhicule.

Pour répondre aux objectifs d'efficacité, le système de régulation détermine les durées des phases et leur enchaînement en fonction des mesures réalisées. Le problème du choix des durées des phases et de leur enchaînement a été l'un des premiers problèmes posés à l'ingénierie du trafic [Kell et Fullerton 1991]. Pour résoudre ce problème, il a fallu définir des grandeurs à mesurer (***variables du trafic***), des moyens pour mesurer ces grandeurs (***Infrastructure de mesure***), des *modèles* les mettant en équation et des approches de résolution (***régulateur***).

1.2.1. Variables du trafic

Les variables du trafic permettent de refléter l'état de la circulation des véhicules. Ces variables expriment soit le comportement moyen des flots de véhicules (***macroscopique***), soit le comportement individuel de la conduite (***microscopique***), sur une section de route donnée. Les variables couramment utilisées sont [H. Gartner, J. Messer et al. 1992]:

- Le **débit** : il correspond au nombre de véhicules observés en un point donné de l'infrastructure pendant un intervalle de temps d'observation. D'une manière plus formelle, le débit moyen $q(t_1, t_2, x)$ au point d'abscisse x entre les instants t_1 et t_2 est défini par le rapport :

$$q(t_1, t_2, x) = \frac{n(t_1, t_2, x)}{t_2 - t_1} \tag{1.1}$$

  dans lequel $n(t_1, t_2, x)$ désigne le nombre de véhicules passés par le point x entre les deux instants qui délimitent le temps d'observation. Expérimentalement, le débit peut être déterminé par de simples comptages sur la route. En théorie, le flot de véhicules est généralement considéré comme un milieu continu. Le débit $q(t, x)$ au point x et à l'instant t est alors défini par :

$$q(t, x) = \lim_{\Delta t \to 0} q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right) \tag{1.2}$$

  Une telle définition ne peut être appliquée dans la pratique. Il s'agit seulement d'une schématisation mathématique. Cependant pour remédier au problème, nous

considérons qu'il y a identité entre $q(t,x)$ et $q(t-0{,}5\Delta t, t+0{,}5\Delta t, x)$ pour de petites valeurs de Δt, de l'ordre 10 à 20 secondes [Cohen 1993]. Une autre approche permet d'estimer le débit instantané à l'aide de mesures périodiques de l'ordre de 4 secondes[Garber et Hoel 1997]:

$$q(t,x) = \alpha \frac{n(t-\Delta t, t)}{\Delta t} + (1-\alpha) q(\Delta t, x) \tag{1.3}$$

où α est un réel positif de correction inférieur à 1.

- La **densité** ou la **concentration** : elle donne le nombre de véhicules présents sur une section de longueur donnée. Ainsi, la concentration moyenne, $k(x_1, x_2, t)$ à l'instant t sur une section de route limitée par les points d'abscisse x_1 et x_2 se définit comme suit :

$$k(x_1, x_2, t) = \frac{n(x_1, x_2, t)}{x_2 - x_1} \tag{1.4}$$

avec $n(x_1, x_2, t)$ le nombre de véhicules présents sur la section à l'instant *t*. Une telle grandeur est par exemple directement observable par photo aérienne ou encore par caméra vidéo. Les théories continues définissent ensuite la concentration $k(x,t)$ au point *x* et à l'instant *t* par :

$$k(x,t) = \lim_{\Delta x \to 0} k\left(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t\right) \tag{1.5}$$

en supposant que si Δx est de l'ordre de 50 à 100 mètres, il y a pratiquement identité entre les valeurs de $k(x,t)$ et $k(x-0{,}5\Delta x, x+0{,}5\Delta x, t)$ [Kutz 2004];

- Le **taux d'occupation** : cette variable est aujourd'hui très couramment employée dans l'exploitation du trafic. Elle est mesurée à l'aide des boucles électromagnétiques. Il s'agit d'une grandeur sans dimension, définie par la proportion de temps durant laquelle la boucle est occupée. Le taux d'occupation se calcule ainsi :

$$\tau = (L + l)k \tag{1.6}$$

où L et l désignent respectivement la longueur moyenne des véhicules et celle du capteur (boucle électromagnétique). Nous remarquons que le taux d'occupation instantané vaut soit 1, soit 0 en fonction de l'état de l'activation de la boucle. Ceci nous informe seulement sur la présence ou non d'un véhicule. Néanmoins, comme pour le débit, nous supposons que, sur un intervalle court d'observation, il est possible d'assimiler le taux d'occupation moyen au taux d'occupation instantané. Nous soulignons aussi le fait que la concentration obtenue par la relation (1.6) est seulement une approximation de la concentration réellement observée.

- La **vitesse moyenne dans le temps** et **dans l'espace** : en un point fixe de la route, la vitesse moyenne u_t durant un intervalle de temps d'observation, est la moyenne arithmétique des vitesses instantanées u_i des N véhicules, passant pendant un intervalle de temps déterminé :

$$u_t = \frac{\sum_{i=1}^{N} u_i}{N} \tag{1.7}$$

La vitesse moyenne d'espace u_s est plus facile à obtenir en pratique par les boucles électromagnétiques. Elle permet d'estimer le temps de trajet sur un segment donné. Ainsi, la modélisation du trafic se base généralement sur le calcul de cette vitesse

moyenne. On la désigne sur une section de route de longueur fixe *d*, où la moyenne des vitesses des *N* véhicules à un instant donné est :

$$u_s = \frac{d}{\frac{\sum_{i=1}^{N} t_i}{N}} \tag{1.8}$$

où t_i est le temps nécessaire au $i^{ème}$ véhicule pour parcourir la distance *d*.

- La **longueur des files d'attente** : cette variable correspond au nombre de véhicules arrêtés derrière la ligne d'arrêt à un feu de circulation. La longueur des files d'attente constitue l'une des grandeurs majeures de l'évaluation d'une stratégie de régulation.
- L'**écart de temps inter-véhiculaire** : il correspond au temps qui s'écoule entre les instants de passage de l'avant de deux véhicules successifs, en un point donné de la route (voir Figure 1- 5). Cette variable se révèle particulièrement utile dans la régulation du trafic. En effet, certains algorithmes de régulation des intersections à feux en ville, fonctionnant en temps réel, font appel à cette variable, comme GERTRUDE (Gestion Electronique de Régulation du Trafic Routier Défiant les Embouteillages) [GERTRUDE 1980; Morrish 1980]. L'écart de temps inter-véhiculaire est fortement lié au débit. En effet, le débit moyen q est l'inverse de l'écart de temps inter-véhiculaire moyen *h*, pour un flot stationnaire :

$$q = \frac{1}{h} \tag{1.9}$$

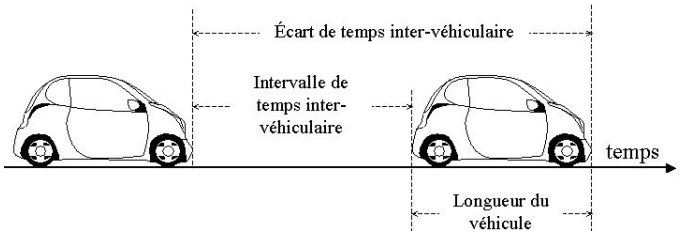


Figure 1- 5. Ecart de temps inter-véhiculaire

La seule variable microscopique citée ci-dessus est l'écart de temps inter-véhiculaire. D'autres variables relatives à la cinématique de chaque véhicule rentrent dans le cadre de la modélisation microscopique du trafic. Elles concernent généralement l'accélération, la vitesse et la position instantanée des véhicules. Cependant, à l'exception des systèmes de régulation qui visent le respect de la vitesse d'approche pour des objectifs de sécurité, la majorité des travaux autour des systèmes de régulation des intersections isolées se base sur les variables cités précédemment. Ces variables sont donc généralement mesurées au niveau des différentes branches d'accès aux intersections.

1.2.2. Infrastructure de mesure

Il existe de nombreux types de capteurs permettant les mesures directes ou indirectes des variables de circulation. Les deux principaux types de capteurs que l'on peut rencontrer [Kamata et Oda 1991; A. Klein, K.Mills et al. 2006] sont :

- **Les capteurs enfouis dans la chaussée** :
  - Les **boucles électromagnétiques** : c'est aujourd'hui le dispositif de mesure des paramètres du trafic le plus répandu dans le monde, tant en ville que sur les voies

rapides et les autoroutes urbaines. Il permet de mesurer les débits, le taux d'occupation, la vitesse et l'écart de temps inter-véhiculaire. Le capteur est constitué d'une boucle inductive, noyée dans le revêtement de la chaussée. Le passage de la masse métallique d'un véhicule au-dessus de la boucle provoque une variation du champ électromagnétique. Cette variation se traduit par un créneau de tension dont la longueur est liée à celles du véhicule et du capteur et au temps de passage.

- **Les détecteurs latéraux** :
  - **Capteurs à ultrasons** et **à effet Doppler** : ce capteur est constitué d'une antenne fixée sur un portique, lequel est positionné dans l'axe de la voie de circulation. Cette antenne émet constamment des ondes qui se propagent à une vitesse connue. Lors du passage d'un véhicule, l'onde émise rencontre un obstacle et est réfléchie. A partir de la différence entre les fréquences de l'onde émise et de celle reçue, la vitesse du véhicule peut être estimée.
  - **Capteurs optiques (vidéo)**: le principe de ces capteurs consiste à utiliser une caméra vidéo et à traiter de manière automatique les images fournies par cette caméra afin de déduire les paramètres du trafic [Avner, Boillot et al. 2000; Chaudy, Delaigle et al. 2004].

Les avantages et les inconvénients des différents capteurs cités ci-dessus sont résumés dans le Tableau 1-1 [A. Klein, K.Mills et al. 2006].

Tableau 1- 1. Résumé des avantages et inconvénients des différents capteurs usuels

Capteur	Avantages	Inconvénients
Boucle électromagnétique	Flexibilité de la conception pour satisfaire une grande variété d'applications Maturité de la technologie Insensibilité aux intempéries Faibles coûts	Installation nécessitant des coupes dans la chaussée Fiabilité globale liée à la qualité des réglages et à la qualité de la maintenance Accès approximatif aux caractéristiques spatiales
Radar à effet Doppler	Insensibilité aux intempéries Mesures directes de la vitesse	Ne détecte pas les véhicules à l'arrêt Dysfonctionnements à proximité des structures en acier
Capteur à ultrason	Maturité de la technologie au Japon	Sensibilité aux conditions climatiques
Capteur optique	Flexibilité de la conception pour satisfaire une grande variété d'applications Possibilité d'installation fixe ou mobile Accès direct à des caractéristiques spatiales	Sensibilité aux intempéries Fiabilité globale liée à la qualité des réglages

Le Tableau 1-2 montre la relation entre les variables de trafic mesurées et les capteurs [FHWA 2005].

Tableau 1- 2. Variables relevées par les instruments de mesure

Capteurs	Débit	densité	Taux d'occupation	Vitesse	Ecart de temps inter-véhiculaire	Longueur des files d'attente
Boucle électromagnétique	×	×[1]	×	×[2]	×	×[3]
Radars à effet Doppler	×		×[4]	×		
Capteur à ultrason	×		×	×		
Capteur optique	×	×	×	×	×	×

Cette liste de capteurs n'est pas exhaustive mais soulignons que les boucles électromagnétiques restent les capteurs les plus répandus en Europe et aux Etats-Unis pour plusieurs raisons. Parmi elles, se trouvent les connaissances développées autour de ce dispositif. D'une part ces connaissances ont induit une maîtrise quasiment incomparable avec les autres dispositifs. D'autres parts, elles ont permis le développement de standards communs de mesures des variables du trafic. Les mesures réalisées à l'aide des boucles électromagnétiques ont encouragé le développement de modèles mettant en relation les différentes variables du trafic. Ces modèles ont servi pour la surveillance et la régulation du trafic.

1.2.3. Modèles du trafic

Nous pouvons classer les modèles de référence en deux grandes parties, à savoir les modèles macroscopiques et microscopiques. A l'image des variables du trafic, la distinction des deux familles de modèles s'effectue à travers le niveau de détail pris en considération. Nous allons par la suite décrire seulement les modèles usuels appliqués à la régulation d'une intersection. Ces modèles interviennent à des niveaux différents. Un ***modèle macroscopique*** (***modèle d'un tronçon***) permet de définir les caractéristiques des routes de l'intersection. Ces caractéristiques sont par la suite déployées au niveau du ***modèle de l'intersection***, afin de poser le problème et de proposer l'approche de régulation. Enfin, un ***modèle microscopique*** est utilisé pour la validation du système de régulation choisi.

Avant de présenter les différents modèles utilisés, rappelons que les véhicules se déclinent en trois modes, à savoir les deux-roues, les poids-lourds (PLs) et les véhicules légers (VL). En général ces modes sont considérés comme un tout, par l'entremise de l'unité de véhicule particulier (*u.v.p*) où le VL vaut 1 *u.v.p*, un camion ou un bus vaut 2 *u.v.p* et un deux-roues vaut 0,2 *u.v.p*. De même en ce qui concerne les mouvements. Un véhicule qui effectue un mouvement de tourne-à-droite ou un mouvement de tourne-à-gauche vaut respectivement 1,1 véhicule ou 1,7 véhicule qui va tout droit. Ces considérations sont prises en compte au niveau du modèle d'un tronçon donné et du modèle de l'intersection. Les modèles de simulation (modèle microscopique) adoptent généralement un certain degré de détail qui leur évite de telles approximations.

[1] Le calcul de la densité requiert une installation adéquate avec plusieurs boucles au niveau des entrées et des sorties d'un segment donné. La densité peut être aussi estimée d'une manière approximative à travers le taux d'occupation comme le montre la relation (1.6).
[2] L'estimation de la vitesse nécessite une installation spécifique qui implique une boucle électromagnétique supplémentaire ou un câble piezo-électrique. Dans tous les cas, la vitesse mesurée est approximative.
[3] La longueur des files d'attente requiert une installation impliquant plusieurs boucles. Cependant en général, l'arrêt prolongé au niveau d'une boucle permet de déduire que la longueur de la file d'attente est au moins proportionnelle à la distance séparant le feu et l'endroit où se trouve cette boucle.
[4] Seulement quand aucun véhicule n'est à l'arrêt.

Modèle d'un tronçon

A notre connaissance [Corréïa 2007], la première formulation macroscopique de l'écoulement du trafic a été proposée par [Lighthill et Whitham 1955]. Le modèle proposé exploite les concepts de base définissant un fluide compressible. Une conséquence de la représentation continue est que la dimension des véhicules est négligée : n'importe quelle portion de route, si petite soit-elle, doit contenir une quantité de véhicule(s) (i.e. éventuellement moins de 1). Certains travaux proposent des modèles à temps discrétisé (ou échantillonné) : les mesures ont lieu à intervalles réguliers [Buisson, Lebacque et al. 1995]. D'autres introduisent des approches [Payne 1971; Papageorgiou et Schmidt 1991; Aw et Rascle 2000] capables d'améliorer respectivement la mise en œuvre et la précision des modèles initiaux.

Les modèles macroscopiques du trafic les plus courants assimilent le trafic à un fluide. Ceci permet d'exploiter les résultats de la mécanique des fluides. Ces modèles sont des corrélations entre les différentes grandeurs qui décrivent les tronçons étudiés selon la *relation fondamentale*. Cette relation découle de l'hypothèse d'un courant de circulation isovélocique (i.e. tous les mobiles ont la même vitesse), où u est la vitesse commune. Dans ce cas simple, il est aisé d'établir la relation suivante :

$$q(x,t) = u \times k(x,t) \tag{1.10}$$

Dans un cas quelconque, la vitesse du flot $u(x,t)$correspond à la vitesse moyenne dans l'espace u_s. Pour un flot stationnaire, $u(x,t)$ est la moyenne harmonique des vitesses des véhicules passant au point *x* pendant une durée Δt.

La relation fondamentale (1.10) permet de caractériser les tronçons à travers le diagramme fondamental qui en résulte. Les corrélations qui complètent cette relation pour former le diagramme fondamental découlent des observations du terrain. Celles-ci suggèrent que la vitesse d'un flot homogène et stationnaire est une fonction monotone décroissante de la concentration [Greenshields 1935] :

$$u = u(k) \tag{1.11}$$

Compte tenu de (1.10) et de (1.11), l'écoulement du trafic sur un tronçon peut être décrit à travers une courbe liant deux des trois variables macroscopiques, i.e. u, k (ou τ) et q. La Figure 1-6 montre l'allure du diagramme fondamental où le débit est en fonction du taux d'occupation[5]. Quelques corrélations, tirées de [Manual 2000], sont données dans le Tableau 1-3. A travers ce diagramme nous pouvons non seulement reconnaître les deux états du trafic, à savoir fluide et congestionné, mais aussi le débit maximal et la concentration critique.

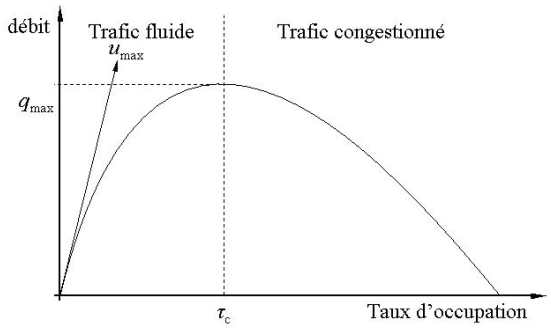


Figure 1- 6. Diagramme fondamental

[5] Compte tenu de la relation (1.6) et des mesures issues des boucles électromagnétiques, le taux d'occupation est généralement utilisé à la place de la concentration pour effectuer les corrélations et ajuster les courbes.

Le diagramme fondamental est sensible à de nombreux facteurs comme la géométrie de la route, la nature et la composition du trafic, les conditions météorologiques, les mesures d'exploitation, etc. Néanmoins, il s'agit d'un outil pratique, bien adapté à divers problèmes de circulation. Il joue un rôle précieux dans la conception et l'exploitation des infrastructures routières. Dans le cadre de la régulation des intersections, la capacité extraite du diagramme fondamental permet d'approcher le débit maximal ou de saturation des différents mouvements ou courants étudiés. Par expérience, il est fréquemment admis dans la littérature que le débit de saturation d'un mouvement direct est proche de 0,5 *u.v.p* par seconde et par voie[6]. Le débit de saturation *s* est un paramètre important de la modélisation des carrefours signalisés.

Tableau 1- 3. Quelques exemples de fonctions permettant d'obtenir le diagramme fondamental où *a* et *b* sont des paramètres à définir par les techniques de régression

Hypothèses[7]	Equations	Taux critique	Capacité
Greenshield	$\frac{q}{\tau} = a\tau + b$	$-\frac{b}{2a}$	$-\frac{b^2}{4a}$
Drew	$\frac{q}{\tau} = a\sqrt{\tau} + b$	$-\frac{4b^2}{9a^2}$	$-\frac{4b^3}{27a?}$
Greenberg	$\frac{q}{\tau} = a\ln(\tau) + b$	$\exp\left(-1-\frac{b}{a}\right)$	$-a\exp\left(-1-\frac{b}{a}\right)$
Underwood	$\frac{q}{\tau} = a\exp(-b\tau)$	$\frac{1}{b}$	$\frac{a}{be}$
May	$\frac{q}{\tau} = a\exp\left(-b\tau^2\right)$	$\frac{a}{\sqrt{2b}}$	$\frac{a}{\sqrt{2be}}$

Modèle d'une intersection

Plusieurs modèles ont été proposés pour mettre en relation les différentes caractéristiques des intersections. Les intersections isolées ont été abordées par les files d'attente [Webster 1958b; Newell 1998b; Tian, Kyte et al. 2001; Pitu et Ning 2007], les chaînes de Markov à décision [C. Dunne, W. Rothery et al. 1968; Baras, Levine et al. 1979; Brookes et Bell 1991], les automates cellulaires [Nagel et Schreckenberg 1992; Daganzo 1994; Wahle, Neubert et al. 2001], les systèmes multiagents [Dresner et Stone 2004b; Ying, Yuguo et al. 2004; Dresner et Stone 2008a; Mandiau, Champion et al. 2008; VanMiddlesworth, Dresner et al. 2008; Vasirani et Ossowski 2008; Aditya, Viswanath et al. 2009; Schepperle, Böhm et al. 2009], les réseaux de Petri hybrides [DiCesare, Kulp et al. 1994; Junwei et Su 2003; Di Febbraro, Giglio et al. 2004; Febbraro et Sacco 2004; List et Cetin 2004], P-temporisés et colorés [DiCesare, Kulp et al. 1994; Gallego, Farges et al. 1996; Tzes, Seongho et al. 1996; Jiacun, Chun et al. 1999; Tolba, Lefebvre et al. 2005], etc. Dans la suite nous mettons l'accent sur le modèle de base.

Une intersection isolée est caractérisée par la définition des groupes de mouvements appartenant à chaque phase P_j et par q_i, s_i, g_i, r_i et C qui correspondent respectivement aux débits d'entrée des différents groupes de mouvements i, aux débits de saturation correspondants, aux temps des verts utiles attribués, aux temps des rouges utiles et au temps du cycle. Une autre variable qui rentre en compte implicitement est le temps perdu L durant un cycle à cause des changements de phases. C'est à travers l'estimation de L que se définissent les temps de verts et de rouges utiles (voir la partie 1.1.2, page 12). Soulignons que nous avons $r_i=r_{i'}=r_j$ et $g_i=g_{i'}=g_j$ si les groupes de mouvements i et i' appartiennent à la même phase P_j. D'autres concepts rentrent

[6] Bien que des valeurs de référence et des formules de calculs relatives à la capacité existent dans la littérature, des mesures réelles couplées à des méthodes statistiques sont nécessaires pour estimer les capacités des routes.
[7] Il est aisé d'utiliser ces hypothèses pour estimer le temps moyen du trajet en utilisant les relations (1.6) et (1.10).

en considération permettant d'identifier le groupe de mouvements critique c_j d'une phase P_j , ce qui permet de calculer le degré de saturation de chaque phase P_j comme suit :

$$x_j = \frac{q_{c_j} C}{S_{c_j} g_j} \tag{1.12}$$

Une phase P_j est dite saturée si $x_j \geq 1$. Une intersection est saturée si au moins une phase est saturée. En d'autres termes, une *intersection saturée* est une intersection où au moins un véhicule observe un cycle complet depuis la zone de stockage sans possibilité de franchir la zone de conflit. Le comportement, durant un cycle, d'un groupe de mouvements qui appartient à une phase non saturée peut être décrit selon le modèle uniforme [Webster 1958a] comme le montre la Figure 1-7.

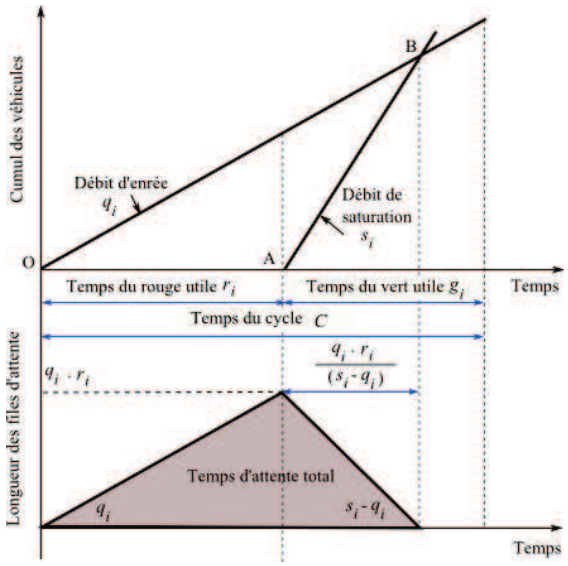


Figure 1- 7. Arrivées et départs des véhicules durant un cycle

Le modèle uniforme du trafic peut être considéré comme étant une base intéressante pour aborder les intersections. Il offre la possibilité d'analyser les durées du cycle et des verts utiles en fonction des différentes caractéristiques du flux, afin d'augmenter l'efficacité du système de régulation proposé. Il nous informe que les durées des phases dépendent uniquement des groupes de mouvements critiques, ce qui a pour conséquence de simplifier les modèles proposés. En outre, à partir du triangle grisé, présenté dans la Figure 1- 7, il est aisé de calculer le temps d'attente moyen d'un véhicule. Il s'agit de la surface du triangle divisée par le nombre total des véhicules durant un cycle, ce qui nous donne l'expression suivante :

$$\frac{r_i^2 s_i}{2\, C \min(0, s_i - q_i)} \tag{1.13}$$

L'expression (1.13) représente ce qu'on appelle le *retard moyen uniforme par véhicule* qui est généralement notée d_1. Cette notation vise à distinguer ce retard du *retard moyen par véhicule d* généralement employé. En effet, en pratique, il arrive souvent que les aléas du trafic saturent la phase pendant un cycle donné. Dans ce cas, l'origine et l'inclinaison de la droite *OB* sont modifiées, afin de prendre en compte la file d'attente initiale et l'augmentation occasionnelle du débit [Lam, Wong et al. 2009]. Les modifications effectuées sur la droite *OB* permettent par la suite de calculer le retard moyen effectif qui s'exprime de la manière suivante :

$$d = (d_1 \times PF) + d_2 + d_3 \tag{1.14}$$

où PF, d_2 et d_3 sont respectivement un facteur de correction, le retard additionnel causé par les aléas des arrivées des véhicules et le retard dû à la file d'attente initialement présente.

Le modèle uniforme est très intéressant pour calculer la durée minimale du cycle. Néanmoins, l'évaluation des performances à l'aide de ce modèle nécessite des formules pour corriger les résultats obtenus. Les corrections peuvent être réalisées grâce aux observations ponctuelles des boucles électromagnétiques [Mahmassani 2005]. En effet, le modèle uniforme ne permet pas d'évaluer, à lui tout seul, les approches de régulation choisies. Pour cette raison, des modèles plus fins sont proposés.

Modèles microscopiques

Plusieurs phénomènes observables dans la réalité, comme l'absence de détection de véhicules de la file d'attente par une boucle électromagnétique à cause de leur position d'arrêt, les incidents et la recherche d'une place de parking, rendent la nature du trafic complexe et difficilement évaluable à travers les outils analytiques présentés précédemment. En effet, le modèle uniforme des intersections n'est pas suffisant (voir (1.14)). Ainsi, la modélisation et la simulation microscopiques sont de plus en plus utilisées dans l'ingénierie du trafic pour traiter des problèmes au niveau opérationnel ou pour évaluer un ensemble d'applications des systèmes de transports intelligents (STI). Pour l'évaluation des nouveaux systèmes de régulation, les modèles ou les outils de simulations microscopiques sont quasiment incontournables, voire exigés. Par conséquent, des outils de simulation de référence sont apparus, comme VISSIM [Wiedemann 1974; Wiedemann 1991], PARAMICS[Fritzsche 1994] ou AIMSUN[Barceló et J.Casas 2002]. Ces outils de simulation microscopiques offrent un environnement où plusieurs scénarii peuvent être introduits et évalués. La plupart des simulateurs de trafic professionnels récents fournissent des environnements de simulation microscopiques multimodaux, c'est-à-dire qui prennent en considération plusieurs modes de transport, typiquement les voitures et les transports en commun, parfois aussi les piétons et les bicyclettes. Ils sont basés sur plusieurs modèles microscopiques du trafic comme les choix dynamiques d'itinéraire ou le stationnement. En ce qui concerne la régulation du trafic au niveau des intersections isolées, deux modèles avec deux niveaux différents de granularité sont proposés (voir Figure 1-8) :

- **Modèles de poursuite** : Le courant de circulation est envisagé comme un mélange de véhicules libres et de véhicules gênés ou suiveurs. Les véhicules libres sont à même d'atteindre leur vitesse désirée, ce qui ne pose pas de problème de modélisation. Les véhicules gênés voient au contraire leur vitesse limitée par celle du véhicule de tête. Ainsi, les modèles de poursuite, aussi appelés modèles véhicule-suiveur, sont utilisés pour décrire et expliquer ce mécanisme [H. Gartner, J. Messer et al. 1992]. Ils décrivent les interactions que chaque véhicule, pris individuellement, entretient avec le mouvement de l'ensemble des autres véhicules et l'infrastructure. Ces modèles considèrent le comportement de l'ensemble conducteur-véhicule comme un système dynamique qui interagit avec son environnement par l'entremise de ses accélérations et freinages. Ces actions sont traduites au moyen d'une équation différentielle décrivant la variation de vitesse du véhicule considéré, en respectant le véhicule qui le précède. Les modèles véhicule-suiveur ont été initiés par [Reuschel 1950; Pipes 1953] et plus amplement développés par [Chandler, Herman et al. 1958; Kometani et Sasaki 1959; Harris 1964; Lee 1966; Herman et Rothery 1969; Lam et Rothery 1970]. Le phénomène de poursuite lie la réaction du conducteur à sa sensibilité et à l'intensité du stimulus définie par la différence de vitesse entre le véhicule considéré et son prédécesseur. La relation peut se résumer par l'équation suivante :

$$\text{réaction}(t + \tau) = \text{sensibilité} \times \text{stimulus}(t)$$

où τ est le temps de réaction de l'ensemble conducteur-véhicule. Plus formellement, cette équation a d'abord revêtu une forme linéaire[Chandler, Herman et al. 1958; Lee 1966], puis non-linéaire [Gazis, Herman et al. 1961].

- **Modèle de particules** : Du fait de leur simplicité, les Automates Cellulaires (ACs) sont devenus un outil très répandu dans la modélisation microscopique du trafic [Wahle, Neubert et al. 2001]. Leur utilisation consiste à considérer les véhicules comme des particules interagissant entre elles. La route est découpée en un nombre fini de sites ou cellules d'une certaine longueur. Chaque site peut être occupé ou vide. À chaque itération, l'état de l'ensemble du système est mis à jour en suivant des règles appliquées simultanément sur tous les véhicules. Les règles satisfont au moins les conditions suivantes :
  - Tous les véhicules veulent s'établir à la vitesse maximale;
  - Les véhicules évitent les collisions entre eux.

  Les modèles de particules du trafic apparaissent avec les travaux de [Gerlough 1956] puis sont étendus par [Cremer et Ludwig 1986; Biham, Middleton et al. 1992]. Un aspect stochastique a été ajouté dans [Fukui et Ishibashi 1996].



(a) modèle de poursuite (b) modèle de particules (Taux d'occupation)

Figure 1- 8. Exemple d'une séquence de simulation avec VISSIM (Sortie 11, A36) [EFFIA, UTBM_SET et al. 2008]

Les modèles de poursuite permettent une simulation fine du comportement des véhicules. Il existe dans la littérature plusieurs modèles de poursuite [Brackstone et McDonald 1999]. Ces modèles sont déployés généralement pour deux applications différentes. La première est la simulation microscopique du trafic [Krauss 1997] et la deuxième concerne les ***régulateurs avancés de la vitesse*** (RAV)[8] [AmericaITS 1997]. En ce qui concerne la simulation microscopique, l'objectif est de reproduire le plus fidèlement possible le comportement des conducteurs. La validation de ces modèles s'effectue en les confrontant à des mesures expérimentales effectuées sur le terrain avec des véhicules équipés de capteurs de distances inter-véhiculaires et de vitesses relatives (radars). Les expérimentations présentées dans [Panwai et Dia 2005] donne un léger avantage au modèle proposé par Gipps [Gipps 1981; Gipps 1986; Anonyme 2002]. En outre, certains modèles s'avèrent très proche des réactions réelles des conducteurs, ce qui leur permet d'évaluer d'une manière relativement précise les différents régulateurs proposés.

1.2.4. Régulateurs

Ce que nous nommons régulateurs, a pour mission d'indiquer au système de signalisation la couleur des feux ou leur changement d'état. Le régulateur définit la séquence des phases et leurs durées. Pour ce faire, il s'appuie sur les mesures reçues et un ensemble de méthodes de calcul ou de règles bien définies. Le régulateur peut être exclusivement matériel ou peut faire appel à l'intervention humaine [Hunt 1982].

[8] Le RAV ajoute à la fonctionnalité du régulateur de vitesse classique qui vise à faire circuler le véhicule selon une vitesse de consigne, l'adaptation de la vitesse de circulation en fonction des obstacles détectés par les capteurs frontaux.

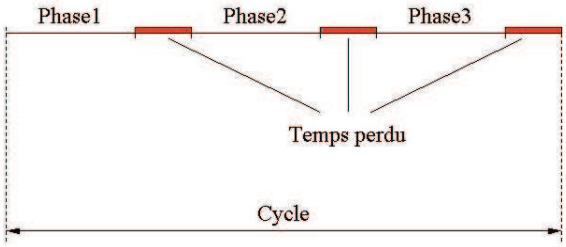


Figure 1- 9. Temps de cycle et la capacité de résorber le trafic

Le premier défi a consisté à calculer la durée optimale du cycle. La durée du cycle pose le dilemme suivant: la capacité de l'intersection augmente lorsque la durée du cycle augmente à cause du temps perdu *L* (voir Figure 1- 9) [Kutz 2004]. Cependant un temps de cycle trop long suppose des temps d'attente importants. Ainsi, le choix du critère s'est porté sur le retard moyen [Chakroborty et Das 2004]. Le modèle présenté dans la Figure 1- 7 a été utilisé pour le calcul de la durée du cycle optimal. Afin de prendre en compte les aléas du trafic qui peuvent saturer l'intersection, l'équation (1.13) a été corrigée en fonction des observations faites a priori [Webster 1958b; Murthy et Mohle 2001]. Webster propose la durée du cycle qui permet d'obtenir le temps moyen d'attente minimal. La formule proposée par Webster reste la formule de référence jusqu'à aujourd'hui [H. Gartner, J. Messer et al. 1992]. La durée du cycle qui résulte de cette formule est communément nommée durée de cycle optimale. Néanmoins, puisque les corrections apportées à l'équation (1.13) varient selon les observations, la formule du cycle optimale peut être modifiée, en fonction [Cascetta 2001]. De même en ce qui concerne le choix des algorithmes utilisés pour la recherche du cycle optimal [Kutz 2004].

Une première application du calcul du cycle optimal s'est effectuée à travers les ***régulateurs cycliques***. La régulation cyclique consiste à répéter, sur une longue période la même séquence de phases de durées constantes, toujours agencées dans le même ordre, de manière à constituer un cycle fixe [Hall 1999]. Cependant, la régulation cyclique souffre d'un problème apparent qui consiste à ne pas prendre en considération les fluctuations de la demande. Le développement des boucles électromagnétiques a permis sur des intervalles de temps relativement courts de mesurer le volume du trafic, de définir son état[9], à savoir fluide ou congestionné, et d'évaluer certains critères. En outre, le fait d'équiper un ensemble d'intersections successives de boucles électromagnétiques rend les données relatives au flux entrant à une intersection isolée encore plus précises. Ceci permet de déployer des stratégies adéquates au niveau de chaque intersection [Bretherton et Bowen 1990; May 1990; H. Gartner, J. Messer et al. 1992], comme arrêter en amont les véhicules entrants à une intersection saturée. Les mesures par les boucles électromagnétiques ont encouragé le développement de régulateurs acycliques qui fonctionnent selon plusieurs principes et appliquent de nombreuses règles [Papageorgiou, Diakaki et al. 2003]. A cause de leur diversité, plusieurs classifications de régulateurs existent dans la littérature. Si nous nous limitons à une intersection isolée, nous pouvons définir trois grandes familles de régulateurs acycliques :

- **Régulateurs semi-adaptatifs** : cette famille de régulateur réagit aux variations du trafic en appliquant un ensemble de règles basées sur les détections effectuées par les boucles électromagnétiques. Elle profite de ces boucles pour optimiser les durées des cycles en évaluant les performances d'une manière assez précise à l'aide de mesures périodiques ;

[9] L'état du trafic est estimé grâce au taux d'occupation (voir Figure 1- 6). Par exemple SCOOT augmente la durée du vert et revoit la durée du cycle s'il détecte un véhicule présent sur une boucle électromagnétique pendant plus de 4 secondes [Bretherton, R. D. et G. T. Bowen (1990). Recent enhancements to SCOOT-SCOOT Version 2.4. Road Traffic Control, 1990., Third International Conference on.]

- **Régulateurs adaptatifs à temps discret**: Cette famille de régulateurs optimise les décisions prises sur un horizon de temps discrétisé en étapes. A la fin de chaque étape, il peut soit prolonger la phase, soit changer de phase. Le concept du cycle est absent ;
- **Régulateurs stocker et transférer (store and forward)** : Cette famille de régulateurs optimise la durée du cycle en fonction des observations durant le cycle précédent.

Régulateur semi-adaptatifs

Les calculs effectués dans le cadre de l'utilisation des régulateurs cycliques (plan de feux) servent généralement de base à tout régulateur semi-adaptatif; s'y ajoutent différentes approches destinées à tenir compte des fluctuations du trafic [Newell 1969; Newell et Osuna 1969; Braban et Boillot 2003] : la programmation horaire, la micro-régulation et la macro-régulation.

- La **programmation horaire** également appelée multiprogrammation à temps fixe entre dans le cadre des variations régulières [Hunt 1982; Papageorgiou, Diakaki et al. 2003]. Cette méthode consiste à disposer de plusieurs plans de feux, selon des situations-types prédéfinies, puis à les mettre en œuvre selon un calendrier programmé. Dans la plupart des configurations, trois plans de feux suffisent : un pour les heures de pointe (matin, midi et soir), un pour les heures creuses du jour et un pour celles de la nuit. Les plans de feux peuvent être soumis à des corrections automatiques réalisées en fonction des observations quotidiennes des boucles électromagnétiques.
- La **micro-régulation** est utilisée pour les variations exceptionnelles et aléatoires et pour les faibles et moyens volumes du trafic [Cowan 1978; Lin et Mazdeyasa 1983; Luh et Lee 1991; Akçelik 1995]. Elle mesure instantanément la demande pour modifier la durée, l'occurrence et/ou l'ordre des phases dans le déroulement d'un plan de feux. Elle agit à l'échelle d'une seule intersection ou d'un petit ensemble d'intersections. Deux techniques sont largement déployées dans le cadre de la micro-régulation :
  - **Véhicule actionneur** : l'idée du véhicule-actionneur remonte avant 1938 [Tyack 1938]. Le principe du véhicule actionneur peut être appliqué partiellement ou totalement au niveau d'une intersection isolée [Morris et Pak-Boy 1967]. L'application partielle concerne les intersections où l'on peut identifier des mouvements dominants en conflit avec des mouvements à très faible volume. Les boucles électromagnétiques sont placées sur les voies avec de très faibles volumes de trafic afin d'insérer une phase dès qu'un véhicule est détecté. L'application totale du principe a besoins de détecteurs placés en amont de chaque zone de stockage. D'abord, un temps de vert initial (temps de vert minimal) est prédéfini. Dès qu'un nouveau véhicule est détecté quelques secondes avant la fin de la phase, le temps de vert sera prolongé par une unité d'extension. Ainsi, la durée du cycle et les temps de phase peuvent varier en fonction de la demande détectée (voir Figure 1- 10). Mais le temps de vert ne dépasse pas un seuil maximal. Plusieurs versions du véhicule actionneur existent [Lin et Mazdeyasa 1983; Luh et Lee 1991; Li et Akçelik 1994; Akçelik 1995]. Elles diffèrent selon le calcul des temps de vert minimaux et maximaux et le calcul de l'unité d'extension qui peut être variable dans le temps. Néanmoins, le temps de vert maximal dépend de la durée du cycle optimal en heure de pointe. Il s'agit généralement d'une approche qui permet à la régulation de s'adapter à une demande qui varie en heure creuse avant d'atteindre son volume critique. Le véhicule actionneur convient aussi aux intersections isolées et éloignées de toute autre intersection régulée.

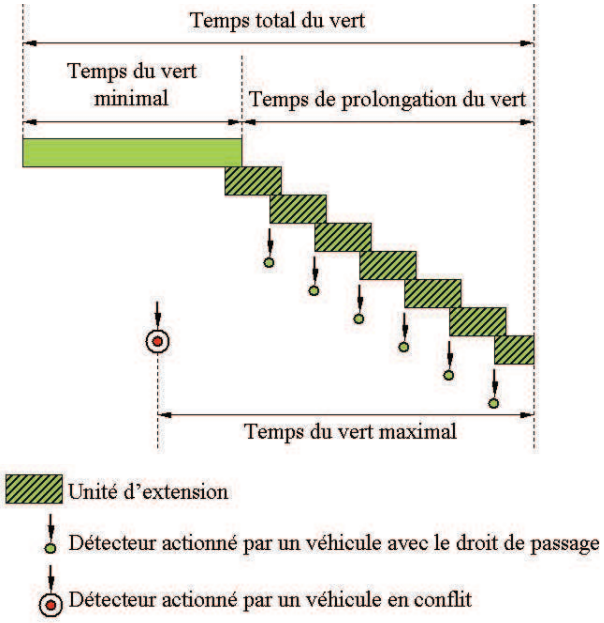


Figure 1- 10. Principe de fonctionnement du véhicule actionneur

- **Correction du temps de cycle** : la durée du cycle doit être modifiée quand le volume du trafic est en augmentation. En effet, lorsque le volume du trafic augmente, un cycle court conduit à la saturation de l'intersection. Afin d'ajuster la durée du cycle à l'augmentation de la demande, le temps de cycle est augmenté dès que le taux d'occupation des boucles électromagnétiques pendant le vert dépasse le taux critique (voir Figure 1- 6). L'observation d'une augmentation débit peut aussi conduire à une augmentation de la durée du cycle. Soulignons, enfin, qu'une baisse des débits observés peut faire baisser le temps de cycle. Cependant, si cette baisse n'est pas observée pendant une longue période de temps, par exemple une heure [De la Bretegue et Jezeguel 1979], ou si elle ne rentre pas dans le cadre du passage à l'heure creuse, le système demande la validation du nouveau cycle auprès des agents régulateurs. En effet, un débit faible peut correspondre aussi bien à un trafic fluide qu'à un trafic saturé (voir Figure 1- 6) ;

- La **macro-régulation** convient pour tous les types de variations, puisqu'elle agit à l'échelle d'un groupe de carrefours sur des durées plus longues, pour coordonner voire synchroniser les carrefours. TRANSYT [Robertson 1969] est à notre connaissance le premier outil permettant une macro-régulation qui s'adapte à la demande. Néanmoins TRANSYT adopte une durée de cycle fixe. Les améliorations apportées à TRANSYT ont fait naître SCOOT puis SCAT [Sims et Dobinson 1980]. L'institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS) a développé un programme baptisé CLAIRE [Scemama 2006] qui peut être couplé à un système de micro-régulation. Ce logiciel permet de détecter les congestions et fournit de nombreuses statistiques sur le trafic. Il recommande également des comportements (favoriser ou retenir le trafic) pour chaque axe.

Ces méthodes ne s'opposent pas et doivent au contraire être utilisées en parallèle. Ensemble, elles assurent au système de gestion des plans de feux une capacité d'adaptation au trafic non négligeable ainsi qu'une efficacité réelle dans de larges plages de fonctionnement, dans la mesure où un suivi et une maintenance du système sont assurés. L'utilisation en parallèle de ces méthodes suppose l'utilisation de nombreux critères d'optimisation du trafic avec une forte intégration des opérateurs humains.

Régulateur adaptatif à temps discrets

A partir des débuts des années 80, un ensemble de régulateurs basés sur des approches discrètes est apparu : OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) [Gartner 1983], PRODYN [Farges, Henry et al. 1983], ALLONS-D (Adaptive Limited Look ahead Optimization of Network Signals - Decentralized) [Porche, Sampath et al. 1996; Porche et Lafortune 1997], CRONOS(ContROl of Networks by Optimization of Switchovers)[Boillot, Blosseville et al. 1992], COP[Sen et Head 1997], RHODES [Sen et Head 1997; Mirchandani et Head 2001; Mirchandani et Lucas 2001], etc. Ils se distinguent par le fait qu'ils ne considèrent pas explicitement les concepts usuels relatifs au cycle. Ils sont basés sur une discrétisation temporelle d'un horizon d'optimisation. A l'exception d'ALLONS-D, cet horizon est généralement fixe et correspond à la durée moyenne d'un cycle, à savoir entre 60 et 150 secondes. Dans le cas d'ALLONS-D, l'horizon est étendu jusqu'à ce qu'il trouve une solution dans laquelle toutes les arrivées prévues sont traitées. Dans le cas de l'horizon fixe, un coût terminal est introduit, afin de pénaliser les files d'attente résiduelles à la fin de l'horizon. Dans tous les cas, l'horizon est découpé en un ensemble d'intervalles de temps nommés étapes.

La longueur des intervalles est comprise entre 2 et 10 secondes selon le régulateur mis en place. La durée de l'étape peut dépendre du volume du trafic observé [Diakaki, Kotsialos et al. 2003]. A chaque étape, le régulateur décide soit de prolonger la phase de l'étape précédente, soit de changer de phase en désignant la nouvelle phase (Voir Figure 1- 11). Cette décision est effectuée à partir de l'optimisation réalisée tout au long de l'horizon. Cependant, le régulateur applique seulement les décisions prises pour quelques étapes initiales. Ces étapes initiales forment un étage (*stage*). Ainsi, les décisions sont appliquées étage par étage. La durée d'un étage dépend des positions des boucles électromagnétiques au niveau de l'intersection sujette à l'optimisation. Elle peut aussi dépendre des infrastructures de mesure appliquées aux intersections en amont [Vincent et Young 1986]. Autrement dit, le concept de l'étage vise à distinguer entre le trafic estimé à partir des véhicules réellement présents dans les différents corridors et l'estimation du trafic futur pour le reste de l'horizon. La durée d'un étage peut être de 10 secondes si l'infrastructure de mesure concerne uniquement une seule intersection. Elle peut varier entre 20 et 40 secondes si plusieurs intersections sont équipées dans le voisinage [Kell et Fullerton 1991].

Le critère généralement mentionné est le retard. Cependant, les régulateurs divergent sur les méthodes d'évaluation de ce retard. Les approches d'évaluation sont sélectionnées de telle sorte à ce qu'elles ne soient pas gourmandes en temps de calcul. De même, les méthodes d'optimisation sont différentes d'un régulateur à un autre. Toutefois, la majorité des régulateurs s'appuie sur des méthodes exactes qui permettent de trouver le chemin optimal. Dans [Newell 1998a; Shelby 2004], plusieurs algorithmes bien connus sont évalués sur la base de leurs complexités et de la qualité de leurs résultats. Les approches utilisées pour mesurer le trafic existant ou le trafic futur sont elles aussi sujettes à des dissemblances. En outre, l'expérience montre que la qualité des résultats dépend de ce choix et du nombre d'intersections pris en compte, ce qui procure un avantage certain pour RHODES.

RHODES s'appuie sur une évaluation à 3 niveaux. Partant du principe des variations régulières, le premier niveau permet de définir la répartition du trafic à partir de l'historique. L'historique permet de mesurer les proportions des mouvements (tourne-à-droite, tout droit et tourne-à-gauche), afin d'estimer les arrivées de véhicules dans une zone de stockage déterminée. Le deuxième niveau applique un modèle mésoscopique nommé APRES-NET présenté dans [Dell'Olmo et Mirchandani 1996]. Ce modèle descend au niveau de groupes de véhicules suiveurs (courant isovélocique). Grâce aux détections des boucles électromagnétiques, ces groupes sont mis en conflit sans signalisation au préalable. L'objectif est de trouver une configuration qui réduit les conflits entre ces groupes. Enfin, apparaît le niveau de l'intersection

isolée, où des décisions sont calculées étage par étage, tout en prenant en compte les mesures prises ultérieurement.

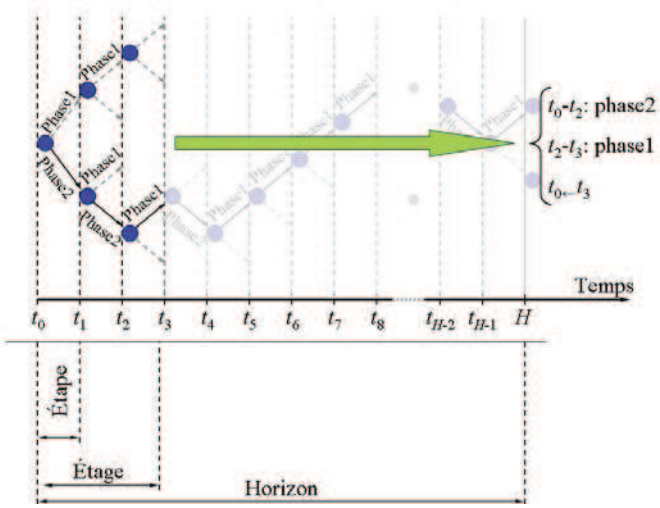


Figure 1- 11. Exemple de fonctionnement d'un régulateur adaptatif au niveau d'une intersection isolée

D'autres approches de régulation rentrent dans le cadre des régulateurs adaptatifs. En effet, plusieurs modèles pour estimer le trafic et pour évaluer les solutions ont été développés dans le cadre de la discrétisation temporelle. De même, en ce qui concerne les méthodes d'optimisation. La discrétisation temporelle a été sujette à l'application de plusieurs modèles et approches d'aide à la décision comme les chaînes de Markov à décision, l'apprentissage par renforcement et les techniques de l'intelligence, à savoir les réseaux de neurones, la logique floue et les heuristiques. Ceci est dû à deux raisons. La première réside dans le fait que des tests réels ont démontré des gains considérables en termes de fluidité du trafic. Ceci a encouragé la recherche dans le cadre des régulateurs adaptatifs. La deuxième se résume au fait que l'intérêt qu'apporte l'intégration de plusieurs intersections se voit affaibli à cause de l'augmentation de la taille du problème à traiter. Or, la discrétisation temporelle exige des calculs rapides, ce qui a encouragé le développement des heuristiques CRONOS [Boillot, Midenet et al. 2000; Boillot, Midenet et al. 2006].

Régulation stocker et transférer

Le principe stocker et transférer a été initialement proposé par Gazis et Potts [Gazis et Potts 1963; Gazis 2002] en 1963. Récemment, ce principe est apparu séduisant car il permet de réguler un réseau d'intersections à l'échelle d'une ville grâce à la simplification du problème. Cette simplification impose le retour au concept du cycle, ce qui n'est pas le cas des régulateurs présentés dans la section précédente. Cependant, elle partage avec les régulateurs adaptatifs, le principe de la discrétisation temporelle. La durée de l'étape k correspond à la durée d'un cycle et les calculs sont basés sur les mesures réalisées pendant le cycle précédent. Ainsi, le concept d'étage est absent car les instants du début et de la fin de l'étage coïncident avec les limites de l'étape, à savoir le début et la fin d'un cycle. Le principe s'appuie sur le modèle uniforme présenté dans la partie 1.2.3 dans la section *Modèle d'une intersection*. Rappelons quelques propriétés tirées de ce modèle. Un cycle C est saturé quand au moins une phase est saturée. Une phase i est saturée lorsqu'elle ne permet pas à tous les véhicules de la file de quitter la zone de stockage. La durée des phases dépend seulement de leur groupe de mouvements critique. Ceci revient théoriquement à supposer que :

$$q_i(k) = \frac{g_i(k)}{C}\eta_i \tag{1.15}$$

où η_i est une variable binaire qui est nulle si le feu est rouge et égale à 1 dans le cas contraire[10].

L'utilisation de l'équation (1.15) conduit à un modèle d'états linéaire pour des réseaux d'intersections de tailles et de géométries arbitraires (les variables en gras indiquent les vecteurs et les matrices).

$$\boldsymbol{x}(k+1) = \boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{\Delta g}(k) + \boldsymbol{Q}\boldsymbol{\Delta q}(k) \tag{1.16}$$

où $\boldsymbol{x}$ est le vecteur d'état composé du nombre de véhicules x_i pour le groupe de mouvements critique de la phase i ; $\boldsymbol{B}$ et $\boldsymbol{Q}$ sont des matrices constantes qui représentent les caractéristiques de l'intersection ; $\boldsymbol{\Delta g} = \boldsymbol{g}(k) - \boldsymbol{g}^N$ et $\boldsymbol{\Delta q} = \boldsymbol{q}(k) - \boldsymbol{q}^N$; $\boldsymbol{g}$ (la commande) est le vecteur composé des durées du vert $g_i(k)$ pour chaque phase i du réseau, tandis que $\boldsymbol{g}^N$ comprend des valeurs nominales des durées des verts ; $\boldsymbol{\Delta q}$ est le vecteur des perturbations avec $\boldsymbol{q}$ le vecteur qui comprend les débits d'entrée pour chaque phase et $\boldsymbol{q}^N$ correspond à des valeurs nominales de la demande. Dans la pratique une limite inférieure de la durée des verts ($g_{i,\min}$) et une limite supérieure de la capacité de chaque zone de stockage ($x_{i,\max}$) sont prises en compte.

Afin de réduire les risques de saturation et les remontées de files, le critère généralement retenu consiste à réduire l'occupation relative des zones de stockage $x_i/x_{i,\max}$. La fonction objective a la forme quadratique suivante :

$$\Gamma = \frac{1}{2}\sum_{k=0}^{K}\left(\|\boldsymbol{x}(k)\|_{\boldsymbol{D}}^2 + \|\boldsymbol{\Delta g}(k)\|_{\boldsymbol{R}}^2\right) \tag{1.17}$$

où $\boldsymbol{D}$ et $\boldsymbol{R}$ sont des matrices diagonales définies positives. Les éléments de $\boldsymbol{D}$ sont égaux à $1/x_{i,\max}$. Cependant, il n'y a pas de méthode particulière pour définir $\boldsymbol{R}$. $\boldsymbol{R}$=$r\boldsymbol{I}$ est obtenu d'une manière empirique à partir de plusieurs simulations. Cependant, une fois r fixé, l'optimisation est effectuée par des approches exactes. Nous remarquons que K est l'horizon de l'optimisation. L'horizon peut ignorer la demande future comme c'est le cas dans [Gartner 1991], comme il peut tendre vers l'infini [Gartner, Assmann et al. 1991]. Quand l'horizon dépasse une étape, il convient d'appliquer l'horizon glissant. Cette approche de régulation a été appliquée en Angleterre [Diakaki et Papageorgiou 2000] et en Grèce [Bielefeldt, Condie et al. 2002]donnant des résultats satisfaisants quand le trafic est fluide.

Notons toutefois que l'approche permet seulement de définir la durée des verts. Elle s'appuie par la suite sur d'autres algorithmes pour leur synchronisation [Diakaki 1999; Diakaki, Papageorgiou et al. 2002]. En outre, les simplifications réalisées impliquent que :

- La discrétisation temporelle ne peut pas être inférieure à la durée d'un cycle, ce qui limite l'observation de phénomènes locaux ;
- La durée du vert calculé correspond généralement à la durée d'une phase ce qui ne permet pas de considérer les oscillations des files d'attente dues aux temps perdus pendant les changements de phases ;
- Comme pour les approches cycliques, le résultat de l'optimisation donne seulement la durée de la phase sans préciser le moment d'application opportun.

Notons à partir de ces remarques, qu'il est nécessaire de voir cette approche comme étant une approche qui vient compléter celles qui sont appliquées dans le cadre des régulateurs semi-adaptatifs. D'ailleurs, c'est dans ce contexte que l'approche stocker et transférer a été déployée.

[10] Cette relation ne veut pas dire que les véhicules arrivent seulement pendant le vert. Elle permet de représenter un débit moyen durant un cycle, selon les hypothèses de saturation.

1.2.5. Synthèse

Suite au bref état de l'art présenté ici, nous constatons ce qui suit :

- Les approches de régulation au niveau d'un ensemble d'intersections viennent se greffer à des méthodes éprouvées qui visent l'amélioration de la fluidité du trafic au niveau d'une intersection isolée. Il est donc nécessaire avant d'améliorer la régulation sur un réseau de carrefours de travailler sur l'intersection isolée.
- Nous remarquons que malgré la distinction entre les trois éléments du système de feux de signalisation (dispositif de signalisation, infrastructure de mesure et régulateur), les développements autour des régulateurs restent contraints par l'infrastructure de mesure et le dispositif de signalisation. Ces deux éléments de la boucle de régulation imposent dans les meilleurs des cas une discrétisation temporelle qui consiste à décider si oui ou non il faut maintenir la phase pour l'étape suivante. En effet, les développements théoriques effectués à partir des mesures réalisées par les boucles électromagnétiques supposent des variables continues, comme le débit, qui requièrent un intervalle de temps pour être mesurées. Ce sont les mesures réalisées dans le passé qui servent à prévoir la demande future prise en compte par le régulateur. De même, la signalisation par des feux visibles par tous les véhicules présents dans la zone de stockage impose la confirmation du maintien d'une couleur des feux pour au moins un intervalle de temps donné.

1.3. Boucles de régulation émergentes

Contrairement au débit, la concentration est mesurable instantanément, reflétant ainsi la situation réelle du trafic. En outre, elle peut concrètement refléter l'état du trafic, i.e. fluide ou congestionné. L'idée de réguler le trafic en fonction des mesures instantanées de la concentration a été encouragée par le développement des capteurs optiques. Malheureusement, elle se heurte au système de feux de signalisation qui suppose l'attribution du vert à un flot de véhicules (groupes de mouvements), ce qui revient à attribuer un intervalle de temps à une phase donnée. Malgré cet obstacle, des développements théoriques et des stratégies de régulations ont été proposés en prenant en compte le nombre de véhicules présents dans la zone de stockage. Nous citons à titre d'exemples, l'approche basée sur les théories des systèmes dissipatifs [Motawej, Bouyekhf et al. 2011] et la stratégie qui consiste à prolonger le vert en fonction des concentrations observées dans les différentes zones de stockage [Gradinescu, Gorgorin et al. 2007]. L'utilisation de la simulation microscopique démontre que les deux approches fournissent des performances honorables. Cependant, bien que la concentration joue un rôle important dans le calcul de la durée de la phase, le régulateur basé sur la théorie des systèmes dissipatifs dépend des mesures de débits, ce qui le conduit à une discrétisation temporelle à l'échelle d'un cycle. Quant à la stratégie de prolongation de la durée du vert, elle n'a pas de fondement théorique.

La littérature actuelle autour de la régulation des intersections observe une nouvelle tendance qui remet en cause toute la boucle de régulation actuelle au niveau des intersections. Les approches qui en résultent sont encouragées par le développement de deux technologies en parallèle. Il s'agit des technologies de positionnement et de la communication sans-fil. Ces deux technologies pourraient informer d'une manière relativement précise le régulateur sur la présence de chaque véhicule, sur sa position et sur sa vitesse. Le régulateur pourrait exploiter ces technologies pour informer chaque véhicule des décisions prises. Ces échanges de données ont imposé de nouvelles réflexions autour de la régulation, conduisant la communauté des chercheurs à l'intersection autonome. Avant d'aboutir à l'intersection autonome, il a fallu passer en revue les différentes composantes du système de feux de signalisation associé à une

intersection isolée, à savoir le dispositif de signalisation, l'infrastructure de mesure et le régulateur. En d'autres termes, l'intersection autonome est un développement parmi d'autres qui s'appuient sur le positionnement et la communication. Nous nommons l'ensemble des développements qui s'appuient sur le positionnement et la communication autour de la régulation d'une intersection signalisée, ***régulation coopérative***. Afin de présenter les travaux actuels du point de vue de l'amélioration de la fluidité du trafic, nous présenterons très brièvement les développements relatifs aux deux piliers de la régulation coopérative, à savoir les technologies de positionnement et les technologies sans-fil.

1.3.1. Technologies de positionnement et de communication sans-fil

Actuellement, il n'est plus possible d'imaginer un système de transport intelligent sans que ce système contienne des entités mobiles capables de connaître leur position et de partager cette information avec d'autres. La commercialisation des dispositifs de positionnement, comme le GPS et les radars frontaux, a renforcé ce point de vue sur les systèmes de transport intelligent. En outre, dans le cadre de la gestion de flottes de véhicules ou de la surveillance du trafic, l'utilisation de la communication sans-fil est quasi systématique. D'autres développements en parallèle et des déploiements à travers des démonstrateurs de la communication sans-fil appliquée aux véhicules particuliers, confirme la perspective de l'application de la communication sans-fil dans les véhicules de demain [Lu, Wevers et al. 2005].

Technologies de positionnement

Les systèmes de positionnement fournissent l'estimation de la position de l'objet en temps réel [Hall 1999]. Depuis les vingt dernières années, de nombreux systèmes de positionnement ont émergé et sont mis en pratique pour des applications civiles, tels que le radar et le GPS (système de positionnement global) [Jizhang et Kubik 1998; Lewandowski, Azoubib et al. 1999; Hoon-Je, Bok-Joong et al. 2009]. Deux types de technologie de positionnement existent actuellement: les systèmes de positionnement relatif et les systèmes de positionnement absolu.

Le positionnement relatif est réalisé par une entité particulière qui peut être mobile ou fixe. Cette entité est dotée d'un système de positionnement relatif qui lui fournit un champ de détection. En fonction de ce champ, l'entité détermine non seulement la position ou la distance des autres entités par rapport à elle, mais elle peut aussi calculer leurs vitesses relatives et leurs sens de circulation. Dans le domaine des systèmes de transports intelligents, la technologie du positionnement relatif peut être appliquée pour la détection d'obstacles ou pour la constitution d'un groupe de véhicules suiveurs (platooning [Reuschel 1950; Gehring et Fritz 1997; Neuendorf et Bruns 2004b; Michaud, Lepage et al. 2006]). Actuellement, des véhicules dotés de cette technologie sont commercialisés. Les systèmes de positionnement relatif sont utilisés pour l'aide au stationnement (voire le stationnement automatique [Kang-Zhi, Minh Quan et al. 2006; Tsung-hua, Jing-Fu et al. 2008; Sunitha, Prema et al. 2010]), pour l'aide au changement de voie et pour les RAV. Le Tableau 1-4 propose un aperçu des capteurs adaptés pour les systèmes de positionnement relatif.

Tableau 1- 4. Systèmes de positionnement relatif

Capteurs		Principe de fonctionnement
Capteur actif	Radar Lidar Acoustique	Mesurer les réflexions de signaux qui ont été transmis par le même capteur
Capteur passif	Optique Infrarouge	Mesurer le rayonnement qui est naturellement transmis par les objets

Le positionnement absolu fournit la position et la vitesse de l'entité qui détient le système dans l'infrastructure routière. Nous disposons actuellement de deux familles de systèmes de positionnement absolu : les systèmes de positionnement globaux et les systèmes de positionnement par points discrets [Hui, Darabi et al. 2007]. Prenons pour la suite, le GPS et le RFID (En anglais : Radio-Frequency IdentiFication) [Bouet et dos Santos 2008] comme exemple pour illustrer les deux familles des systèmes de positionnement. Le GPS est un système de positionnement global et le RFID est un système de positionnement par points discrets. Le GPS et le RFID sont les deux dispositifs le plus couramment utilisés. Les deux, à savoir le GPS et le RFID, sont déployés dans des contextes différents en fonction de leurs avantages et de leurs inconvénients présentés dans le Tableau 1-5. Cependant, ils peuvent dans certains cas être couplés afin de bénéficier de tous leurs avantages [Lu, Chen et al. 2007].

Tableau 1- 5. Comparaison entre le positionnement par le RFID et le GPS

	GPS	RFID
Précision	4~20m	Exact
Implémentation	Récepteur et satellite	Tag et lecteur
Cartographie numérique	oui	Non
Sensibilité à la météo	Non	Non
Flexibilité	Dans tous les lieux à l'exception de l'intérieur d'un tunnel et dans une zone dense de bâtiments de hauteurs importantes	Dépend de l'emplacement des instruments sur l'infrastructure et du champ de détection des lecteurs
Coût	Environ 100 Euros	Tag : faible[11] lecteur : élevé

Le système de RFID se compose de deux éléments: le lecteur et les étiquettes (en anglais : Tag) [Chong, Hongyi et al. 2007]. Pour obtenir la position de l'objet, le lecteur et le tag doivent être à proximité. Deux scénarii sont possibles, le premier consiste à installer les tags sur l'infrastructure et d'équiper les véhicules d'un lecteur [Miah et Gueaieb 2007]. Les tags deviennent les positions de référence du système. Au passage du véhicule au niveau du tag, le véhicule est informé sur sa position exacte. Ceci est le cas du positionnement des trains dans le système de signalisation ERTMS/ETCS [Hassami et Foord 2001; Bloomfield 2006]. L'autre scénario, consiste à mettre des lecteurs dans l'infrastructure et de placer les étiquettes au niveau des véhicules. Les lecteurs doivent être placés à des endroits fixes et être reliés à un système informatique central. Ainsi, ils deviennent les points de référence du système. Si trois ou plusieurs marqueurs de position (lecteurs) reçoivent le signal provenant d'un tag, la position de ce tag peut être calculée par la triangulation du signal provenant des différents lecteurs. La position de chaque tag est calculée par l'ordinateur central. Dans les deux scénarii, les équipements au sol seront appelés ***marqueurs de position***. D'autres équipements peuvent fonctionner sous ce même principe afin de palier le manque de précisions du GPS. Ces équipements exploitent la communication sans fil [Vossiek, Wiebking et al. 2003] comme le Bluetooth.

Le GPS est la technologie de positionnement la plus répandue à l'heure actuelle, pour la simple raison qu'elle ne requière pas de dispositifs au sol [Jiung-yao et Chung-Hsien 2008]. Seul l'utilisateur disposant d'un appareil peut obtenir sa position avec une précision relativement correcte. Le GPS est basé sur l'exploitation des signaux transmis par les satellites reçus et exploités par un récepteur pour connaître sa position sur la surface de la terre. Cette technologie est largement utilisée pour la navigation et l'orientation des conducteurs. Cependant, à cause de sa précision relative et des problèmes rencontrés dans certains milieux urbains, le GPS ne convient pas aux applications nécessitant un niveau de sécurité assez élevé. Dans [Jiung-yao et

[11] Tout dépend de la technologie mise en place.

Chung-Hsien 2008], il est clairement mentionné que l'amélioration de la précision du positionnement satellitaire n'est prévue que pour le long terme.

Cependant, des solutions existent. Celles-ci consistent à coupler le positionnement global au positionnement par points discrets ou à la communication sans-fil, d'une manière générale. Cette dernière solution fait émerger, actuellement la technologie RTK (Real-Time-Kinematic) qui couple l'utilisation des mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis par les satellites et l'emploi d'une station de référence qui fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une précision de l'ordre du centimètre. La position de cette station doit être renseignée avec précision. Un autre moyen pour améliorer la précision de la position calculée par le GPS consiste à la corriger à travers les différents capteurs de mouvements embarqués dans le véhicule [Kelly 1994; W¨ubbena, Bagge et al. 1996; White, Bernstein et al. 2000; Zahaby, Gaonjur et al. 2009].

Communication sans-fil

Dernièrement, nous assistons au développement et au déploiement de plusieurs technologies sans-fil dans plusieurs domaines. Le GPRS, le GSM, le Wi-Fi, le WiMax, la 3G, le Zigbee, le Bluetooth, le RFID, etc. sont des technologies testées, voire appliquées dans le domaine du transport en général [Shiraki, Ohyama et al. 2001; Luo et Hubaux 2004; Mitropoulos, Karanasiou et al. 2010]. À titre d'exemple certaines lignes de trains sont équipées du GSM-R et du RFID pour les signalisations latérales et à bord des trains. Aussi, les transports routiers ou combinés de marchandise assistent au déploiement d'un panel assez large des technologies sans-fil, allant du GPRS au RFID. Cependant, la portée et les applications de ces technologies sont différentes.

Depuis au moins dix ans, la communauté du transport assiste au développement d'une nouvelle thématique de recherche nommée la ***conduite coopérative*** [Tsugawa 2002; Kais, Bouraoui et al. 2005; Tan et Jihua 2006]. Cette thématique s'intéresse plus particulièrement aux applications de la communication sans-fil dans le transport routier. Dans le domaine de la conduite coopérative, un intérêt particulier a été dédié à la communication sans-fil avec une portée à l'échelle du kilomètre (quelques kilomètres). A cette échelle, la communication est plus pertinente, dans la mesure où les évènements communiqués relèvent du voisinage immédiat du véhicule. Il s'agit ainsi d'utiliser un système de communication sans-fil de voisinage (CSV)[12], afin de fournir une signalisation de proximité [Mathias 2005]. Néanmoins, il est envisagé, si nécessaire, de relier l'information à travers plusieurs stations CSV[13] pour dépasser la portée de cette technologie.

Une station CSV peut être embarquée dans un véhicule comme elle peut être installée au sol. Ainsi deux types de communication sont possibles, à savoir la communication inter-véhiculaire (V2V)[Wischhof, Ebner et al. 2005] et la communication entre le véhicule et l'infrastructure (V2I) [Nakamura, Kawashima et al. 1994]. Aussitôt que deux stations CSV ou plus sont à proximité (accessibles), elles sont connectées entre elles, formant ainsi un réseau ad hoc où toutes les stations CSV connaissent la position, la vitesse et le sens de circulation des autres stations CSV, afin de fournir des alertes ou des informations utiles à la conduite [Girard, de Sousa et al. 2001; Tsugawa, Kato et al. 2001], à la surveillance ou à la régulation [Mathias 2005]. Pour étendre la portée des messages, chaque station CSV est considérée comme un routeur qui envoie son message à travers le réseau multi-hop atteignant ainsi des véhicules hors de portée du message initial. Cependant, pour que deux stations CSV puissent communiquer, il faut au moins qu'elles puissent lire les messages reçus. Cette problématique a orienté ces dix dernières années les recherches vers la standardisation des CSV aux Etats-Unis, en Europe et au Japon [Chisalita et Shahmethri 2002; Blum, Eskandarian et al. 2004]. Comme la technologie utilisée est intimement

[12] Dedicated Short Range Communications (DSRC)
[13] La station CSV peut être traduite en anglais par DSRC unit (intellidrive) ou ITS station (car-2-car).

liée aux applications souhaitées de celles-ci, les efforts de standardisation ont été réalisés à travers des scénarii d'utilisation de la CSV.

Aux Etats-Unis plusieurs acteurs, comme la NHTSA (National Highway Trafic Safety Administration), la ASTM (American Society for Testing and Materials) et le CAMP (Crash Avoidance Metrics Partnership), ont participé à la standardisation des technologies CSV. Cependant, ce sont les rapports publiés en février 2004 et en juillet 2006 [NHTSA 2005; FCC 2006] par la FCC (US Federal Communications Commission) qui ont respectivement fixé la bande de fréquences et les canaux qui seront utilisés. Actuellement, le programme IntelliDrive lancé par le DOT (US Department of Transportation) et la RITA (Research and Innovative Technology Administation), décline à travers plusieurs situations de conduite, un ensemble de conditions d'utilisation des technologies de signalisation de voisinage [Greg Krueger 2009]. Ce programme repose sur les résultats de plusieurs projets comme le VSC (Vehicle Safety Communications) [VSC 2007] et le CICAS (Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems) [CICAS 2009].

Au niveau européen, des travaux visent l'élaboration et la publication d'une norme européenne pour les systèmes coopératifs et la validation des processus associés. Ceci est réalisé à travers le consortium car-2-car, en collaboration avec les travaux menés dans le cadre du programme COMeSafety issu du programme eSafety de la commission européenne. Le consortium car-2-car ainsi que les programmes et les projets européens sur lesquels il s'appuie unissent l'industrie automobile, les équipementiers, les exploitants et les chercheurs. Les objectifs principaux consistent à fournir une communication sans-fil libre d'accès et inter-opérable à travers l'Europe et à élaborer des stratégies de déploiement poussant à encourager la généralisation des applications V2V et V2I. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs projets européens et nationaux ont été lancés [Chevreuil 2002; Schulze, Mäkinen et al. 2008; SimTD 2010].

Au Japon, le programme ASV (Advanced Safety Vehicle) dans sa troisième et sa quatrième versions s'intéresse clairement aux communications V2V et V2I. Ce programme dans lequel s'engage l'UTMS (Universal Traffic Management Society of Japan), fait contribuer l'industrie automobile [Aotani, Yamaoka et al. 2002] et les ministères concernés. Actuellement, ce programme vise une commercialisation des technologies V2V et V2I dans un horizon proche et se préoccupe ainsi de la coordination internationale pour synchroniser les efforts mondiaux autour de la technologie CSV [Wani 2006]. SMARTWAY est un programme qui vise le développement et l'exploitation de cette technologie [Fujimoto, Sakai et al. 2008].

La technologie CSV est dérivée du standard IEEE 802.11, connu aussi sous le nom du Wireless LAN. En Europe et aux Etats-Unis, la bande de fréquence allouée est de 5.9 GHz [NHTSA 2005]. Au Japon, elle est de 5.8GHz [Tsuboi, Yamada et al. 2009]. Des efforts ont été réalisés pour distinguer la technologie CSV de la technologie RFID (positionnement par points discrets), dans le sens où il n'y aurait pas de distinction entre une station CSV esclave (tag) et une station CSV maîtresse (lecteur) [Kain 2006]. Le type de la communication déployée entre deux stations CSV peut être défini selon la source et la destination des messages (i.e. V2I et V2V), le mode de communication, à s'avoir s'il s'agit d'un simple envoi de messages (à sens unique) ou de dialogue entre deux ou plusieurs stations CSV, et le nombre de destinataires du message, en d'autres termes si le message est destiné à une station CSV particulière (communication point-à-point) ou à plusieurs stations CSV (communication multipoints). Par exemple, si nous voulions alerter les véhicules que le feu rouge est imminent, nous aurions besoin d'une communication de l'infrastructure aux véhicules (V2I), à sens unique, et multipoint [Schwengler et Pendharkar 2005]. D'autres précisions sur la communication peuvent être ajoutées, tels que le mode de transmission des messages (périodique ou non) et sa fréquence. La standardisation CSV a été abordée afin que cette technologie couvre tous les types de communication et modes de

transmissions décrits précédemment, pour une portée à une échelle qui peut dépasser le kilomètre [Motsinger et Hubing 2007; Tsuboi, Yamada et al. 2010].

Plusieurs projets ont servi et servent encore de socle à la standardisation à travers des programmes structurants. En effet, rappelons que les standards choisis de la technologie de communication dépendent fortement du contexte de déploiement de celle-ci. De même, un standard rigide particulier peut contraindre le champ d'application de la CSV [Coopers 2006; INTERSAFE 2006; Brignolo, Vivo et al. 2008]. Ces projets concernent non seulement des extensions des applications actuelles comme la navigation, le payant autoroutier et les RAV mais aussi de nouvelles applications qui ne sont possibles qu'à travers le développement du CSV comme par exemple la gestion des accès aux zones de dilemme[14] dans une intersection. Les différents projets ont soulevé de nombreux problèmes de recherches relatifs à la CSV qui nécessitent d'être approfondis, à cause de la mobilité des entités communicantes, de la nécessité du couplage avec les capteurs présents, des contraintes temporelles sur la réception de certaines informations et du large panel de données transmises qui relèvent de priorités différentes [Fan et Krishnan 2006]. Ces interrogations sont abordées par plusieurs projets où des solutions émergent. Nous assistons ainsi actuellement à plusieurs démonstrations qui mettent en pratique la CSV pour des applications diverses comme le témoigne le Cooperative Mobility Showcase 2010 qui a eu lieu à Amsterdam [Amditis 2010; Brakemeier 2010]. En outre, des stations CSV sont d'ores et déjà commercialisées [Motsinger et Hubing 2007].

1.3.2. Régulation coopérative des intersections isolées

Plusieurs scénarii adoptés pour le développement de la technologie CSV sont dédiés aux intersections. En effet, la CSV couplée au positionnement absolu peut contribuer à l'amélioration de la sécurité des intersections grâce à la signalisation à bord des véhicules qui se superpose aux feux de circulation actuels. Par exemple, la signalisation à bord des véhicules peut alerter sur un feu rouge imminent, sur le non-respect de la signalisation par un véhicule appartenant à un mouvement conflictuel ou sur la présence d'un piéton qui traverse. La CSV et le positionnement peuvent aussi contribuer à l'amélioration de la fluidité du trafic à travers la réorientation des conducteurs en cas de congestion au niveau d'une intersection, grâce à des fonctionnalités avancées de la navigation [Sakaguchi, Uno et al. 2000]. En outre, nous assistons à des projets en cours d'étude qui visent à réguler le trafic à travers la CSV et le positionnement [CVIS ; Mimuro, Miichi et al. 1996; Lu, Wevers et al. 2005; Savari 2010; SimTD 2010]. Dans ce cas, la boucle de régulation peut être modifiée.

Dans le milieu purement académique, les hypothèses du déploiement conjoint de la CSV et du positionnement a imposé la nécessité de réétudier la boucle de régulation actuelle. Plus précisément, les mesures de trafic peuvent être obtenues par la communication V2I, ce qui remet en cause l'infrastructure de mesure actuelle (*nouvelle infrastructure de mesure*). De cette façon, le régulateur est en permanence au courant du nombre de véhicules, de leurs positions et de leurs vitesses. En poussant la réflexion plus loin, les régulateurs peuvent être basés sur de nouveaux modèles mathématiques qui exploitent les données fournies par la communication sans-fil (*nouveaux régulateurs*). En outre, la communication V2V et la communication V2I permettent la signalisation à bord (Sakamoto, Kobayashi et al. 2006; Moon, Lee et al. 2007). Ceci contribue non seulement au respect des feux actuels, mais ouvre également de nouvelles perspectives à la régulation du trafic, où la signalisation est adressée à chaque véhicule d'une manière personnalisée (*régulation autonome*).

[14] Un feu rouge imminent crée une zone appelée zone de dilemme à l'intérieur de la zone de stockage. Les véhicules circulant dans cette zone à une certaine vitesse ne pourront pas s'arrêter au feu rouge, même si cette vitesse respecte la limitation.

Nouvelle infrastructure de mesure

Les nouvelles approches proposées partent de l'hypothèse forte que tous les véhicules sont équipés d'une station CSV couplée à un système de positionnement précis. Elles supposent aussi la présence d'une station CSV centrale installée au niveau de l'infrastructure. La communication entre la station CSV centrale et les stations CSV à bord permet de renseigner le régulateur sur la position et la vitesse de chaque véhicule présent dans l'intersection. En fonction de ces renseignements, le régulateur calcule la couleur adéquate du feu. Le travail qui a retenu notre attention est celui présenté dans [Gradinescu, Gorgorin et al. 2007] car celui-ci exploite la conduite coopérative pour améliorer la fluidité du trafic au niveau d'une intersection isolée.

Le régulateur s'appuie sur des mesures permanentes du trafic. Ces mesures lui permettent par la suite d'optimiser la durée du cycle et la durée des phases. Il calcule après chaque cycle révolu, la durée du nouveau cycle optimal en s'appuyant sur la formule de Webster. Pour ce faire, il a besoin d'estimer les débits de chaque mouvement ainsi que la capacité associée aux voies. L'estimation du débit est un processus complexe. Tout d'abord, il relève les requêtes qui émanent des véhicules pour traverser l'intersection. Ces requêtes peuvent arrivées de plusieurs endroits, dans les limites de la portée de la station CSV, à savoir quelques kilomètres[15]. Chaque véhicule déposant sa requête est suivi afin d'estimer son temps de trajet. A partir de ces estimations, le régulateur calcule le débit prévu pour le nouveau cycle. Ainsi, l'infrastructure de mesure fait théoriquement gagner au régulateur, une plus grande visibilité sur la demande du trafic et une meilleure prévision de son volume.

Le calcul du cycle qui résulte de ces estimations est seulement indicatif. En effet, le cycle optimal s'appuie uniquement sur les débits estimés pendant le cycle précédent. Pour faire face à ce problème, les auteurs ajoutent quelques règles, comme par exemple ne pas donner le vert à une voie vide. Ces règles procurent une plus grande souplesse au concept du cycle utilisé. Ainsi, l'approche proposée est très proche de celles employées dans le cadre des régulateurs semi-adaptatifs. La grande différence entre l'approche présentée ici et celles appliquées dans le cadre des régulateurs semi-adaptatifs réside dans l'infrastructure de mesure. Celle-ci est composée seulement d'une seule station CSV qui remplace un nombre important de boucles électromagnétiques situées au niveau de plusieurs intersections en amont. La station CSV peut suivre en permanence la position des différents véhicules.

Afin de valider l'approche, les auteurs s'appuient sur le modèle microscopique de Wiedemann [Wiedemann 1974; Wiedemann 1991; Fellendorf et Vortisch 2001]. Il s'agit du modèle de poursuite utilisé par VISSIM pour simuler le trafic. Il compare son approche avec un régulateur cyclique optimisé en fonction des débits injectés durant la période de simulation. Il constate un gain d'environ 28% en termes de retard, ce qui est considérable. Ces gains sont expliqués par la faculté d'adaptation aux variations occasionnelles du volume du trafic. Cette adaptation est d'autant plus appréciable qu'elle émane de requêtes effectives.

Nouveaux régulateurs

La nouvelle infrastructure de mesure peut permettre de nouvelles approches de régulation qui sortent du cadre des régulateurs présentés précédemment. Deux travaux ont retenu notre attention. Le premier [Fang et Elefteriadou 2006; Fang et Elefteriadou 2008] n'emploie pas le concept du cycle. Seulement un horizon d'optimisation d'une centaine de secondes est suggéré. Les requêtes effectuées par les véhicules, permettent de mesurer le volume du trafic et de reproduire le trafic grâce à un modèle microscopique simplifié. Un algorithme génétique qui

[15] Si les véhicules circulent avec une vitesse moyenne de 2.5 m/s (9 km/h), la portée de 4 km permet d'estimer le volume du trafic pour les 100 prochaines secondes.

propose des durées et des séquences de phases, fait évoluer des scénarii de signalisation, afin de garder le meilleur scénario testé par le simulateur. Ce scénario est appliqué à l'horizon simulé. Le critère utilisé est la capacité de l'intersection, à savoir le débit de sortie.

Pour le deuxième travail de [Wunderlich, Cuibi et al. 2008], le régulateur considère seulement les véhicules présents dans les différentes zones de stockage de l'intersection. Le régulateur déduit toutes les phases admissibles, ce qui augmente le nombre de possibilité de signalisation. Il décide de la couleur des feux en fonction du nombre de véhicules présents et de leurs mouvements. Les observations sont faites périodiquement. La période est de l'ordre de quelques secondes. Ainsi, après chaque observation la couleur des feux est renouvelée, puis maintenue jusqu'à la fin de la période. Le critère utilisé est le temps de séjour dans la zone de conflit. Le modèle, employé pour choisir la couleur des feux s'appuie sur la formule de Little[Little 1961]. Plus précisément, le régulateur choisi la phase qui s'adresse au plus grand nombre de véhicules présents.

L'approche proposée a été simulée par VISSIM et comparée au principe du véhicule actionneur. Rappelons que le principe du véhicule actionneur est seulement intéressant pour les volumes de trafic faibles ou moyens. L'approche proposée permet des améliorations notables pour ces plages de volumes du trafic. Par contre, son intérêt devient moins évident quand le trafic est dense. En effet, dans une plage avec une forte demande, elle présente des résultats comparables aux résultats basés sur le principe du véhicule actionneur. Ainsi, cette approche s'avère très intéressante seulement en heure creuse.

Intersection autonome

Dans l'intersection autonome, on considère que les véhicules traversent l'intersection sans intervention humaine. En ajoutant à cette hypothèse, l'hypothèse d'une infrastructure de mesure basée sur la CSV et le positionnement précis, il est possible de donner plus de souplesse à la distribution des droits d'accès aux véhicules. Il suffit que chaque véhicule lance une requête d'un droit d'accès. Cette requête sera traitée en considérant non seulement l'ensemble des requêtes reçues mais aussi l'état dans lequel se trouve le véhicule. Une réponse à la requête consiste à lui préciser les conditions d'accès à la zone de conflit (voir Figure 1- 12).

Plusieurs scénarii ont été proposés dans le cadre de l'intersection autonome. Généralement, le régulateur se base seulement sur des données microscopiques pour distribuer les droits d'accès à la zone de conflit. Ces données ont pour objectif de calculer non seulement le moment à partir duquel le véhicule sera prêt pour traverser la zone de conflit mais aussi la durée de monopolisation de chaque point conflictuel. Ces calculs peuvent être effectués par le régulateur en recevant la position et la vitesse du véhicule. Un autre scénario consiste à ce que chaque véhicule prévoit les caractéristiques temporelles et géométriques de son accès à la zone de conflit et les envoient au régulateur sous la forme d'une promesse qu'il devra honorer. Suite aux différentes requêtes ou promesses, le régulateur peut procéder de plusieurs manières. Dans [Li et Wang 2006; Li, Fei-Yue et al. 2007; Batz, Watson et al. 2009], le régulateur recherche la configuration qui permet de vider l'intersection au plus tôt. Il distribue par la suite les autorisations d'accès en fonction. Dans [Dresner et Stone 2004b; MParent et De la Fortelle 2005; Bouraoui, Petti et al. 2006; Dresner et Stone 2006; Dresner et Stone 2008a], le régulateur suit des règles simples du type premier arrivé premier servi ou des règles plus sophistiquées comme distribuer les droits d'accès suivant la configuration qui permet de faire passer le maximum de véhicules. Dans cette dernière configuration, les véhicules qui n'ont pas reçus le droit d'accès reformulent leur requête. Les droits d'accès distribués aux véhicules contiennent des consignes très strictes sur l'instant d'accès à la zone de conflit et la durée de disponibilité du parcours demandé.

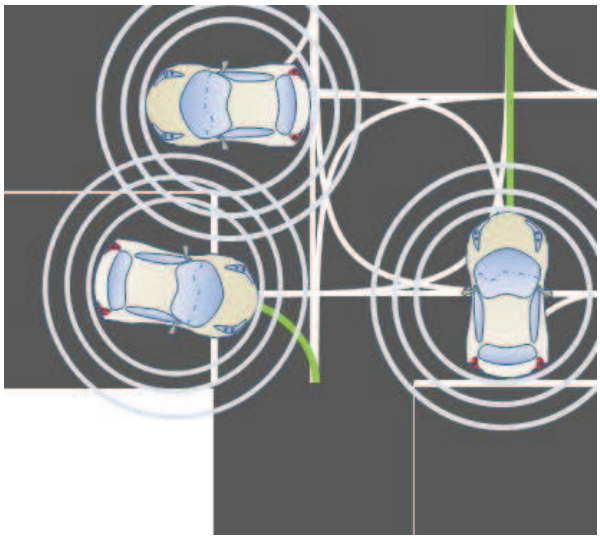


Figure 1- 12. Exemple de circulation des véhicules dans la zone de conflit d'une intersection autonome

Un autre scénario de l'intersection autonome consiste à ne pas considérer de régulateurs. Selon une priorité précise des voies, les véhicules autonomes s'insèrent dans le flot de véhicules qui circulent dans la voie prioritaire. Le véhicule calcule sa vitesse pour bénéficier d'un espace inter-véhiculaire opportun lui permettant de rejoindre le flot de véhicules. Ce scénario a été simulé sur une intersection simple qui est constituée d'une voie d'insertion à une voie prioritaire. Dans tous les cas, la simulation de l'intersection autonome démontre une amélioration sensible de la fluidité du trafic. Les retards moyens peuvent être divisés par deux au moins [Naumann, Rasche et al. 1997; Uno, Sakaguchi et al. 1999; Neuendorf et Bruns 2004a; Lijuan et Xuebo 2008].

1.3.3. Synthèse

L'évolution technologique actuelle du positionnement et de la communication sans-fil ouvre de nouvelles perspectives à la régulation du trafic en général. La conduite coopérative peut être appliquée dans plusieurs domaines relatifs à la sécurité du trafic. Elle peut aussi participer à l'amélioration de la fluidité du trafic à travers une meilleure régulation au sein des intersections.

L'hypothèse du déploiement des technologies du positionnement et de la communication sans-fil pour réguler les intersections offre un panel large des possibilités. Ce déploiement peut se superposer aux boucles de régulation existantes, comme c'est le cas des différentes applications de sécurité. Les technologies du positionnement et de la communication sans-fil peuvent aussi faire partie de cette boucle de régulation. Cependant, lorsque le système de signalisation reste basé sur les feux tricolores, les calculs consistent à décider de la durée du vert pour une période donnée. Ceci reste relativement proche des systèmes de régulation actuels.

L'exemple de l'intersection autonome implique fortement ces deux technologies en leur attribuant les rôles de l'infrastructure de mesure et du dispositif de signalisation. Avec un tel déploiement de ces technologies, le contexte dans lequel opère le régulateur est modifié. Au lieu de calculer la durée du vert ou décider si le vert peut être maintenu jusqu'à une nouvelle observation, il calcule le moment opportun d'accès à la zone de conflit pour chaque véhicule. Dans ce contexte opérationnel, les simulations démontrent une amélioration nette de la fluidité du trafic, à travers plusieurs politiques de régulation. Cependant, les modèles utilisés conviennent seulement à des véhicules qui arrivent à prévoir leur comportement car ils sont entièrement autonomes.

1.4. Conclusion

La régulation d'une intersection isolée est généralement basée sur un dispositif de signalisation, une infrastructure de mesure et un régulateur qui choisit la consigne. Pour améliorer la fluidité du trafic au niveau des intersections isolées, les efforts se sont orientés vers la proposition d'algorithmes et de méthodes de calculs permettant d'émettre la consigne la mieux adaptée à la situation observée du trafic. Cette consigne est dépendante du dispositif de signalisation mis en place et du système de mesure. Le schéma classique suppose une signalisation tricolore qui émet des consignes destinées à un courant particulier et des boucles électromagnétiques qui ne distinguent pas les véhicules. Les calculs effectués consistent donc à choisir une couleur de feux pour une durée définie.

Les développements des technologies de positionnement et de la communication sans-fil ouvrent de nouvelles perspectives à la régulation des intersections. En effet, chaque véhicule peut émettre une requête d'un droit de passage. La consigne est ensuite envoyée à chaque véhicule en réponse à sa requête. Ce scénario a été supposé dans le cadre de l'étude des intersections autonomes. Dans ce contexte, le régulateur peut effectuer des calculs mieux adaptés à la situation observée du trafic, voire à la position de chaque véhicule. Plus précisément, il décide le temps alloué à chaque véhicule en fonction du parcours demandé au niveau de la zone de conflit. Les différents travaux témoignent d'une nette amélioration des conditions de circulation quand le système de régulation prévoit les caractéristiques temporelles et géométriques du passage de chaque véhicule.

Lorsque les véhicules sont entièrement autonomes, leur comportement peut être prévu avec une précision relativement correcte, ce qui facilite la tâche du régulateur. Lorsque nous voulons déployer une approche similaire sans contraintes particulière sur l'agent de conduite, il faut adapter la boucle de régulation. Plus précisément, il faut non seulement poser de nouvelles hypothèses relatives à l'infrastructure de mesure et au dispositif de signalisation, mais aussi fournir un modèle et une approche d'optimisation adéquats. Le chapitre qui suit présente notre proposition à travers une intersection simple.

Chapitre 2 . REGULATION COOPERATIVE D'UNE INTERSECTION ELEMENTAIRE ISOLEE

Introduction

La conduite coopérative repose sur la possibilité des échanges d'information entre le véhicule et son environnement de conduite, à savoir l'infrastructure et les véhicules à proximité. L'avantage de ce scénario est de pouvoir, d'une part, fournir des données relativement précises sur les événements qui ont lieu à proximité des véhicules et, d'autre part, d'envoyer des consignes ou des messages d'alerte à bord des véhicules. Ces deux avantages sont néanmoins soumis aux critères de la robustesse, de la pertinence et de la rapidité de la communication sans-fil. Des projets de recherches et de développements abordent ces différents critères à travers des applications de sécurité. En parallèle, d'autres travaux partent de l'hypothèse du bon fonctionnement de la conduite coopérative afin d'évaluer son potentiel à travers le déploiement de nouveaux concepts de la régulation du trafic. Dans le domaine de la régulation des intersections, le concept de l'intersection autonome paraît prometteur puisqu'il dégage des performances très intéressantes. Cependant, comme nous l'avons décrit précédemment, ce concept repose tout d'abord sur l'hypothèse de véhicules entièrement autonomes. En outre, l'intersection autonome nécessite une infrastructure de mesure relativement complexe qui surveille chaque point conflictuel de la zone de conflit.

L'originalité du concept de l'intersection autonome est de personnaliser les consignes envoyées à chaque véhicule. En d'autres termes, chaque consigne est envoyée au véhicule selon son état. Cette personnalisation peut être vue comme une continuité du principe du véhicule-actionneur, puisque le véhicule actionne son droit de passage à travers sa requête. Quand les véhicules sont autonomes, il est possible de prévoir ou de contrôler avec un certain degré de précision les caractéristiques temporelles et géométriques de leur accès à la zone de conflit. Cependant, quand les véhicules sont conduits par l'homme, le concept de l'intersection autonome requiert des recherches supplémentaires.

Étudier le système du véhicule-actionneur coopératif pour des véhicules ordinaires (sans contraintes sur l'agent de conduite) peut faire appel à plusieurs modèles du trafic qui dépendent des hypothèses faites apriori. Il est donc nécessaire de poser le contexte de circulation des véhicules en définissant la boucle de régulation qui sera adoptée. Puisque l'accès de chaque véhicule à la zone de conflit est un processus qui met en relation une série d'évènements dénombrables, les outils de modélisation et d'analyse des systèmes à événements discrets nous semblent appropriés, pour aborder le problème de régulation dans le cadre du système du véhicule-actionneur coopératif. Ainsi, nous ferons appel à la modélisation par les réseaux de Petri et aux techniques de l'optimisation combinatoire pour améliorer la fluidité d'une intersection élémentaire.

Ce chapitre vise à présenter notre approche du véhicule-actionneur coopératif au sein d'une intersection élémentaire. Il est organisé comme suit : premièrement il présente le concept du véhicule-actionneur coopératif en le distinguant des systèmes de régulation actuels. Ensuite, il pose les hypothèses sur la boucle de régulation, afin de définir le contexte dans lequel opère le système de régulation. Cette description fera dégager deux contextes différents. La modélisation du problème ainsi que les approches de régulation sont abordées selon chaque contexte. Enfin, les approches proposées sont confrontées à d'autres approches de la littérature, à travers la simulation microscopique.

2.1. Système étudié

Le système du véhicule-actionneur coopératif (SVAC) suppose une meilleure intégration des véhicules et des éléments de la boucle de régulation du trafic. Chaque véhicule qui envoie une requête d'un droit de passage est individuellement examiné. Le droit de passage est adressé à chaque véhicule en fonction des données envoyées par le dispositif sans-fil embarqué. Nous visons à adapter le SVAC aux véhicules sans contraintes sur l'agent de conduite. Toutefois, plusieurs interrogations théoriques et pratiques ont besoin de réponses. Quelles sont les données nécessaires pour distribuer le droit de passage? Quels sont les dispositifs de mesures ? Comment assurer la sécurité entre les véhicules? Quels indicateurs de performance pourrions-nous utiliser ? Pour répondre à ces interrogations, il est nécessaire de poser le contexte dans lequel évoluent les véhicules. Ce contexte est décrit à travers la définition du SVAC et de l'architecture de la boucle de régulation qu'il implique.

2.1.1. Nouveau système de régulation : Système du véhicule actionneur coopératif

Nous définissons SVAC comme suit :

Définition 2-1: Le Système du Véhicule Actionneur Coopératif régule la circulation aux intersections, en décidant d'une manière explicite la séquence de passage des véhicules qui traversent la zone de conflit. Une séquence est un ordre strict de la distribution du droit de passage aux véhicules. Le droit de passage est affiché au conducteur grâce à la signalisation à bord. Chaque véhicule est traité individuellement et attend son droit de passage avant de traverser l'intersection. Le véhicule informe les autres (les véhicules ou l'infrastructure) au moins du moment de son arrivée à la zone de stockage, de l'instant de son accès à la zone de conflit et de l'instant de son départ. D'autres informations telles que le freinage, la vitesse, la distance inter-véhiculaire et la direction peuvent être requises. Ce système nécessite au moins un système de communication sans-fil de voisinage (CSV) entre les véhicules et l'infrastructure et un dispositif de positionnement. Par conséquent, aucun feu de signalisation verticale n'est requis, si la CSV et le positionnement sont robustes.

Contrairement aux systèmes de régulation classiques qui optimisent la séquence et la durée des phases ou engagent une phase pour le prochain intervalle de temps, le SVAC décide précisément à quel véhicule est destiné le droit de passage et informe seulement les véhicules admis. Cependant, au premier abord, la distinction entre le SVAC et le régulateur adaptatif (voir la partie 1.2.4) est subtile car les deux systèmes sont basés sur des mesures continues du trafic. De plus, la différence entre un feu vert et une autorisation donnée au conducteur n'est pas évidente sans explications. Ainsi, nous attirons l'attention du lecteur sur les faits suivants. Dans le cas d'un feu vert, certains véhicules peuvent accélérer pour atteindre le vert, ou contrairement rouler lentement et rater un vert qu'ils devaient normalement atteindre. Dans le cas du SVAC, les droits de passage sont adressés aux véhicules et seulement les véhicules autorisés peuvent traverser la zone de conflit. Cette distinction n'est pas seulement due à la signalisation à bord. En effet, plusieurs travaux visent à introduire la signalisation à bord [Kato, Tsugawa et al. 2002; Li, Jingyan et al. 2005; Li et Wang 2006; Amditis, Bertolazzi et al. 2009] afin d'informer les conducteurs sur la couleur des feux tricolores. Dans ce cas, un contrôle précis de la zone de dilemme [A. Klein, K.Mills et al. 2006] est nécessaire pour éviter les collisions. La zone de dilemme est définie par les véhicules qui observent initialement un feu vert mais une fois arrivés au niveau du feu, ils constatent un feu rouge sans être capables de freiner. La signalisation qui retransmet la couleur des feux tricolores doit prendre en compte ce problème, à travers des calculs relatifs à la zone de dilemme. Le SVAC n'a pas besoin de tels calculs car les droits de passage sont au préalable destinés aux véhicules, ce qui distingue ce système des systèmes traditionnels de régulation.

Cependant, il est important de souligner que le système traditionnel à feux et le SVAC peuvent cohabiter. Par ailleurs, cette cohabitation est nécessaire si tous les véhicules ne sont pas équipés d'une station CSV ou d'autres équipements requis. Dresner et Stone [Dresner et Stone 2004b; Dresner et Stone 2006] donne un schéma d'une cohabitation des deux systèmes dans lesquels les véhicules autonomes partagent la même infrastructure que les véhicules conduits par l'homme. Les premiers sont gérés par un système de réservation multi-agents (intersection autonome) et les derniers sont soumis à un système traditionnel à feux. Un autre exemple plus simple est la priorité aux bus [Hounsell, McLeod et al. 2004; Hounsell, Shrestha et al. 2007]. Tout le trafic ordinaire est contrôlé en fonction de données fournies par les boucles électromagnétiques ou selon l'historique du volume du trafic. Lorsqu'un bus arrive, il informe le régulateur qui raccourcit ou prolonge la phase. Quand le bus quitte l'intersection, le régulateur revient au système traditionnel.

Afin de présenter SVAC, il est nécessaire de le rattacher à une intersection, à une infrastructure de mesure et à un dispositif de signalisation. Bien qu'il ne soit pas possible de fixer définitivement les équipements utilisés, à cause des développements actuels dans les domaines de la communication sans-fil de voisinage et du positionnement, il est nécessaire de présenter une architecture de la boucle de régulation qui permet par la suite de mettre en exergue les différentes hypothèses.

2.1.2. Nouvelle boucle de régulation

L'intersection étudiée dans ce chapitre est une intersection élémentaire constituée d'un croisement de deux mouvements directs. Les deux mouvements sont supportés par deux rues perpendiculaires, comme le montre la Figure 2- 1. Chaque rue est à sens unique et divisée en trois zones : zone de stockage, zone de conflit et zone de sortie. Le dispositif de signalisation et l'infrastructure de mesure impliquent des équipements aussi bien au niveau de l'infrastructure qu'au niveau des véhicules, ce qui les rend difficilement distinguables. En supposant que seuls les véhicules équipés sont admis pour traverser l'intersection étudiée, les feux de signalisation et les boucles électromagnétiques ne sont pas considérés. Voici les quatre principales technologies qui équipent aussi bien les véhicules et que l'intersection dans le cadre du SVAC étudié :

- Technologie du positionnement par points discrets ;
- Technologie CSV ;
- Technologie de signalisation ;
- Régulateur.

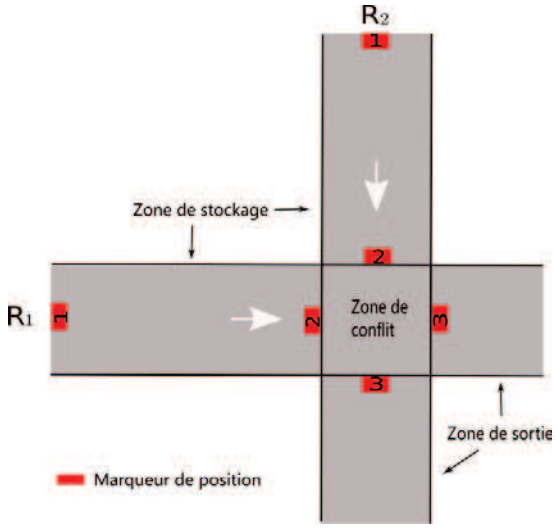
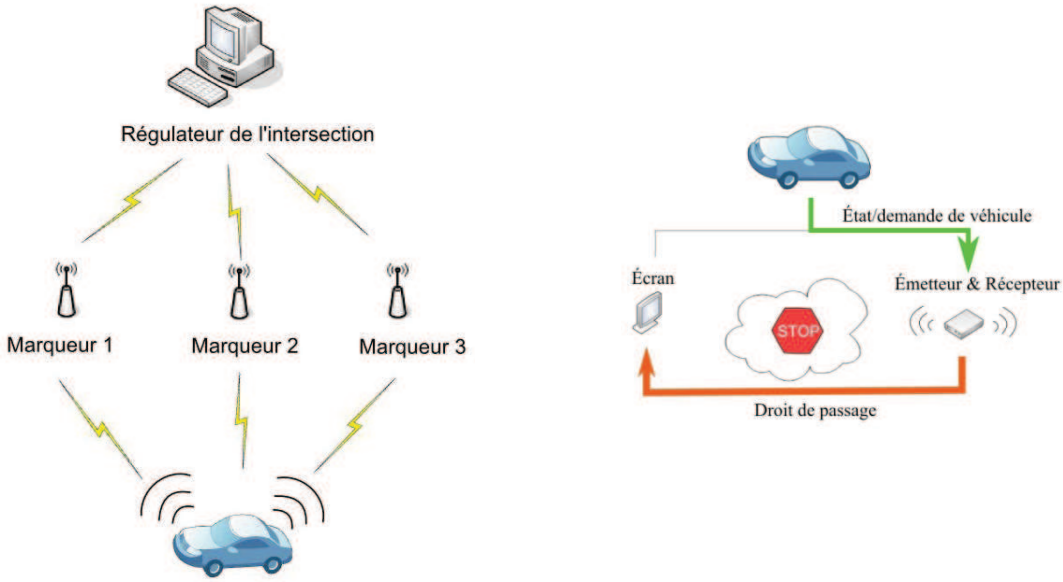


Figure 2- 1. Intersection élémentaire

L'objectif principal de la ***technologie du positionnement par points discrets*** est de garantir qu'un véhicule authentifié est dans une zone particulière de l'infrastructure, à savoir la zone de stockage, la zone de conflit ou la zone de sortie. Cette technologie nécessite des véhicules et une infrastructure équipés [Bouet et dos Santos 2008], à l'image de la technologie RFID (voir 1.3.1). Chaque rue dispose de trois marqueurs de position (représentés par un rectangle rouge dans la Figure 2- 1) localisés à l'entrée de chaque zone. Au moment du passage du véhicule au dessus d'un marqueur de position, cette technologie combinée à la technologie CSV permet au régulateur d'identifier le véhicule et de confirmer soit l'arrivée du véhicule à l'intersection (premier marqueur position), soit l'accès du véhicule à la zone de conflit (deuxième marqueur position), soit son départ (troisième marqueur de position). La technologie a ainsi le rôle de l'infrastructure de mesure. Plusieurs dispositifs peuvent être utilisés dans le cadre du positionnement discret. Nous citons à titre d'exemple les capteurs optiques avec des marquages au sol, les lecteurs RFID avec des étiquettes ou la technologie RTK avec une numérisation précise de l'intersection.

La ***technologie CSV*** constitue le noyau de la régulation SVAC. L'infrastructure et tous les véhicules doivent être équipés d'une station CSV. La technologie CSV permet de partager les données relatives à la position du véhicule dans l'infrastructure. Elle est aussi le support des requêtes et de la distribution des droits de passage. Par ce fait, elle contribue non seulement aux mesures du trafic, mais aussi au dispositif de signalisation. Pour des raisons de clarté, l'intersection et les véhicules seront représentés par leurs stations CSV respectives. L'infrastructure dénomme la station CSV munie des données relatives au positionnement discret des véhicules présents (voir Figure 2- 2-a). Le véhicule désigne la station CSV embarquée reliée à l'écran à bord du véhicule pour afficher les pictogrammes selon si le véhicule est autorisé ou non à traverser la zone de conflit (voir Figure 2- 2-b). Nous remarquons à partir de cette description que la frontière entre les dispositifs de signalisations et l'infrastructure de mesure n'existe pas car la même station CSV réceptionne les requêtes des véhicules et envoie la signalisation aux véhicules.



a- Infrastructure b- Véhicule

Figure 2- 2. Infrastructure et véhicule

Ces deux technologies forment la base de l'équipement nécessaire à la régulation SVAC. Elles peuvent être complétées par d'autres dispositifs de mesures, pour la sécurité et la fluidité du trafic. Par exemple, nous pouvons inclure des régulateurs avancés de la vitesse (RAV) ou la technologie du positionnement global (GPS) pour informer l'infrastructure d'un éventuel changement de sens de circulation.

Le ***processus de signalisation*** ressemble à un système de cadenas. Si le cadenas est déverrouillé (ouvert), le véhicule possède le droit de passage. Sinon, le véhicule n'est pas autorisé à traverser la zone de conflit et doit freiner avant la fin de la zone de stockage. Ainsi, le droit de passage est une clé reçue par un véhicule afin de libérer son droit. Cette clé est détenue par l'infrastructure qui la transmet aux véhicules. On peut noter quelques analogies entre ce système et les feux de signalisation. Lorsque le droit de passage est verrouillé, le conducteur voit un signal rouge sur l'écran à bord du véhicule. Si le droit de passage est déverrouillé, un signal vert est affiché à l'écran. La couleur par défaut du signal est rouge. Il devient vert lorsque le véhicule reçoit la clé.

En ce qui concerne le ***régulateur***, on suppose que l'infrastructure peut avoir deux niveaux différents d'engagement. Au niveau supérieur, l'infrastructure est responsable de la distribution des droits de passage. Le calcul des séquences est ainsi réalisé par un régulateur centralisé au niveau de l'intersection, en fonction des données reçues. Au niveau inférieur, l'objectif de l'infrastructure est simplement de maintenir la zone de conflit à l'abri des incidents. Dans ce cas, l'infrastructure désigne les véhicules qui peuvent distribuer les droits de passage de manière autonome. Dans la suite, nous appelons le niveau supérieur «**régulateur SVAC centralisé**» et le niveau inférieur «**régulateur SVAC décentralisé**» [Wu, Abbas-Turki et al. 2009a; Wu, Abbas-Turki et al. 2009c; Wu, Abbas-Turki et al. 2010]. Dans le premier cas, le régulateur est un calculateur associé à l'infrastructure. Dans le deuxième cas, le régulateur est constitué de tous les calculateurs associés à chaque station CSV dans l'intersection. Ces deux régulateurs sont décrits dans la partie suivante à travers le scénario de régulation qu'ils impliquent.

2.1.3. Deux nouveaux protocoles : SVAC centralisé et SVAC décentralisé

Rappelons que nous considérons deux niveaux d'implication de l'intersection, ce qui nous a conduits à définir deux types de régulateurs. Chaque régulateur implique un scénario particulier.

Protocole 1 : Régulateur SVAC centralisé

La Figure 2- 3 présente le schéma de fonctionnement du régulateur SVAC centralisé. Lorsqu'un véhicule passe sur le premier marqueur de position. L'infrastructure lui envoie la carte de l'intersection et verrouille son droit de passage, i.e. un pictogramme rouge est affiché à bord du véhicule. En même temps, le véhicule transmet sa requête à l'infrastructure pour déverrouiller son droit de passage. En fonction des requêtes émises par tous les véhicules et de leurs états, l'infrastructure (le régulateur) calcule la meilleure séquence de passage. Ensuite, elle distribue les clés appropriées d'abord aux véhicules admis dans la même rue (ou appartenant au même courant). Lorsque le dernier véhicule admis passe sur le troisième marqueur de position, l'intersection procède à la libération des véhicules de la rue opposée (ou l'autre courant conflictuel) et ainsi de suite. Le troisième marqueur de position observe la sortie des véhicules de la zone de conflit afin que les clés puissent être transmises au courant opposé.

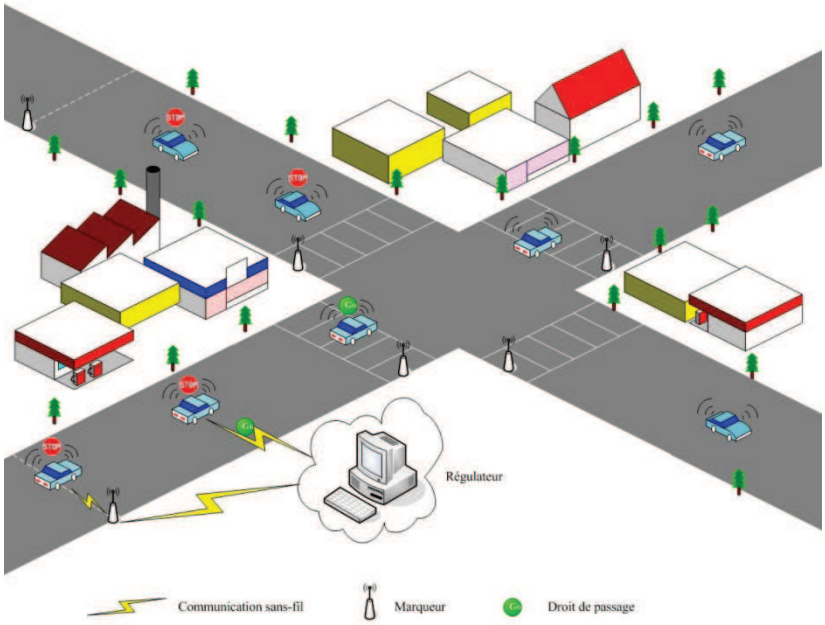


Figure 2- 3. Régulateur SVAC centralisé

Si certains véhicules arrivent avant la fin de la séquence, l'intersection recalcule une nouvelle séquence sans tenir compte des véhicules qui ont déjà reçu le droit de passage. Cela signifie que le nouveau point de départ de l'optimisation correspond au départ du dernier véhicule admis recensé par son passage sur le troisième marqueur de position. L'objectif de cette règle est d'éviter un freinage d'urgence inutile pour les conducteurs. En effet, si l'optimisation est réalisée à chaque nouvelle arrivée de véhicule, certains conducteurs peuvent observer le vert puis le rouge sur leur écran.

On peut noter que le deuxième marqueur de position n'est pas utilisé pour calculer la séquence. Néanmoins, il est très important car il est chargé de vérifier que chaque véhicule qui rentre dans la zone de conflit possède une clé. Dans le cas contraire l'intersection peut réagir en imposant un freinage d'urgence aux autres véhicules.

Protocole 2 : Régulateur SVAC décentralisé

Contrairement au régulateur SVAC centralisé, le régulateur SVAC décentralisé ne calcule pas une séquence de passage pour les véhicules. Pourtant, l'infrastructure détient initialement une clé. En fonction d'un protocole prédéfini, elle envoie la clé à un véhicule qui est en charge de distribuer les clés aux autres véhicules. Cette clé est transmise d'un véhicule à un autre, à condition que l'infrastructure ne récupère pas la clé (voir Figure 2- 4). Si aucune situation dangereuse n'est détectée, l'infrastructure ne récupère pas la clé avant que le dernier véhicule avec la clé passe sur le troisième marqueur de position. Cela permet d'éviter un freinage inutile. Les trois marqueurs fonctionnent ainsi comme dans le cas du régulateur SVAC centralisé présenté précédemment.

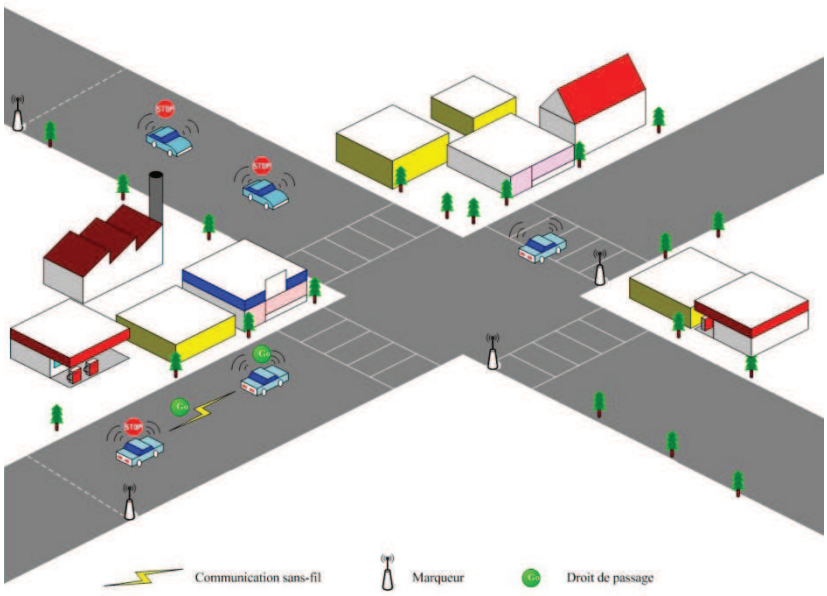


Figure 2- 4. Régulateur SVAC décentralisé

Dans ce contexte la séquence est calculée grâce aux règles fixées pour transmettre les droits de passage. En effet, chaque véhicule participe à la constitution de la séquence. La condition qui permet au véhicule détenteur de la clé de transmettre sa clé à un autre véhicule constitue le cœur de l'algorithme du calcul des séquences. Par exemple, si chaque véhicule transmet la clé au véhicule qui est arrivée juste après lui, il s'agit de proposer la séquence Premier Arrivé, Premier Servi (PAPS).

Discussion

En résumé, nous avons présenté un aperçu du SVAC. Cette description n'est pas exhaustive mais elle décrit la configuration et les fonctionnalités de base, qui permettent par la suite de traiter le problème de régulation à travers le calcul des séquences de passage des véhicules. Bien que l'objectif de nos travaux soit d'étudier la fluidité du trafic, les différents concepts utilisé dans le SVAC prennent en considération quelques aspects relatifs à la sécurité, notamment lorsque les véhicules sont conduits par l'homme. Les concepts du droit d'accès et de la séquence permettent aux conducteurs de focaliser leur attention sur l'environnement de conduite au lieu d'avoir comme obsession la crainte d'attendre un autre cycle au risque de forcer le passage. La technologie du positionnement par points discrets couplée à la CSV vise à garantir un minimum de sécurité, lorsqu'un véhicule commet une infraction au niveau de la zone de conflit. En effet les deuxièmes et troisièmes marqueurs de position couplés aux stations CSV informent l'infrastructure qui réagira en fonction. Nonobstant de ces différentes fonctionnalités de sécurité, il est nécessaire d'approfondir l'étude du SVAC avec le souci de garantir des intersections sûres. Avant d'étudier ce point, il nous incombe tout d'abord d'analyser théoriquement le concept afin d'évaluer son potentiel en termes d'amélioration de la fluidité du trafic. Répondre à une telle interrogation requiert une modélisation adaptée au SVAC.

2.2. Modélisation du système

Proposer une signalisation personnalisée aux véhicules pour améliorer la fluidité du trafic se heurte systématiquement à la complexité inhérente du trafic. Ce problème se pose initialement lorsque nous cherchons à modéliser le comportement des véhicules au sein des intersections. En d'autres termes, le choix du modèle du trafic est l'une des clés pour s'affranchir du problème de la complexité du trafic. En effet, d'une part, utiliser un modèle continu (modèle macroscopique)

basé sur la représentation uniforme des arrivées de véhicule rend le modèle incapable de déterminer les séquences de passage, puisqu'il est plutôt adapté à l'optimisation des durées des phases. D'autre part, appliquer le modèle microscopique de poursuite implique la difficulté de formaliser le problème du calcul de la séquence. En effet, ce modèle est plutôt approprié à la simulation d'une séquence définie. Il est ainsi nécessaire de proposer un modèle mesoscopique adapté au niveau du détail requis. Dans ce sens, les modèles réseaux de Petri (RdP)[René et Hassane 1997; René et Hassane 2005] des intersections méritent une attention particulière.

L'idée d'appliquer les RdP aux intersections n'est pas nouvelle. Elle date au moins de 1986, où un RdP coloré est appliqué pour la modélisation des feux de signalisation par Jensen [Jensen 1986]. Cependant ce modèle est plutôt adapté à l'identification des exclusions mutuelles (les phases) et à la simulation. Pour aborder le problème de la commande (la régulation), d'autres travaux se sont intéressés à la modélisation des zones de stockage par les RdP. Ces travaux proposent une modélisation hybride où le trafic est représenté par un modèle continu et la signalisation par un modèle discret [Bouyekhf, Abbas-Turki et al. 2003; Junwei et Su 2003; Di Febbraro, Giglio et al. 2004; Febbraro et Sacco 2004]. Plus récemment, des modèles à base de l'algèbre des dïoides [Baccelli, Cohen et al. 1992] permettent de dénombrer les véhicules présents, tout en respectant certaines propriétés macroscopiques du trafic. Cette modélisation mathématique a été dérivée d'un modèle RdP discret où la route a été divisée en sections d'une certaine longueur (comme les modèles cellulaires). Le modèle en algèbre dioïdes décrit les trois états du trafic (fluide, saturé et congestionné) et considère séparément chaque arrivée de véhicule [Corréïa, Abbas-Turki et al. 2006].

La principale difficulté qui se présente lorsqu'on utilise les modèles RdP discrets est de synthétiser une commande pour un système comportant des conflits. Or, le SVAC, comme tous les systèmes de régulation aux intersections, présente un degré élevé de concurrence et est caractérisé par des ressources partagées et des conflits de ressources. Un premier pas a été réalisé dans ce sens à travers la modélisation présentée dans [Correia, Abbas-Turki et al. 2009], où les auteurs ont introduit des contraintes en fonction des séquences afin de contourner cette difficulté. Dans la suite, nous nous inspirons de cette approche afin de modéliser les contraintes sur les séquences des évènements observés aux intersections. Ces contraintes sont issues des comportements reconnus des véhicules aux intersections et sont formulées à l'aide du modèle RdP.

2.2.1. Étude du comportement des véhicules aux intersections

Rappelons que nous nous intéressons au croisement de deux mouvements critiques représentés par l'intersection isolée de la Figure 2- 1. Les caractéristiques du débit de circulation sont fondamentales pour réguler le trafic aux intersections isolées. Cependant, le concept proposé par le SVAC est différent des feux traditionnels. Ainsi, au lieu de considérer les débits d'entrée et de sortie, nous nous sommes intéressés aux événements observés par les marqueurs de position:

- Le véhicule arrive à l'intersection (le premier marqueur) ;
- Le véhicule accède à la zone de conflit (le deuxième marqueur) ;
- Le véhicule quitte l'intersection (le troisième marqueur).

Les arrivées de véhicules sont les données d'entrée du problème de la régulation. Pour calculer les séquences de passage, le système a besoin d'estimer les temps d'accès à la zone de conflit en fonction des temps d'arrivée des véhicules. Il a aussi besoin d'évaluer les temps pour libérer cette zone.

En supposant que les véhicules sont munis d'un droit d'accès, nous pouvons déduire selon les caractéristiques du flot le temps moyen de trajet [Fang et Elefteriadou 2006; Chin-Woo, Sungsu

et al. 2008], à travers l'ajustement de la courbe débit-taux d'occupation (voir le Tableau 1-3 et la note 7). Cependant, cette approche nous fournit seulement un temps moyen adapté à un flot de véhicule qui ne peut pas être applicable à l'approche microscopique que nous voulons adopter. Par conséquent, nous donnons une borne inférieure du temps trajet entre les premier et deuxième marqueurs de position.

Soit τ le temps minimal pour parcourir la distance D entre le premier marqueur et le deuxième marqueur de position. τ peut être aisément obtenu à partir de la limitation de la vitesse v_{max} et la distance D :

$$\tau = \frac{D}{v_{max}} \tag{2.1}$$

Afin de compléter l'équation (2.1), on introduit brièvement les comportements reconnus des véhicules en fonction de la signalisation.

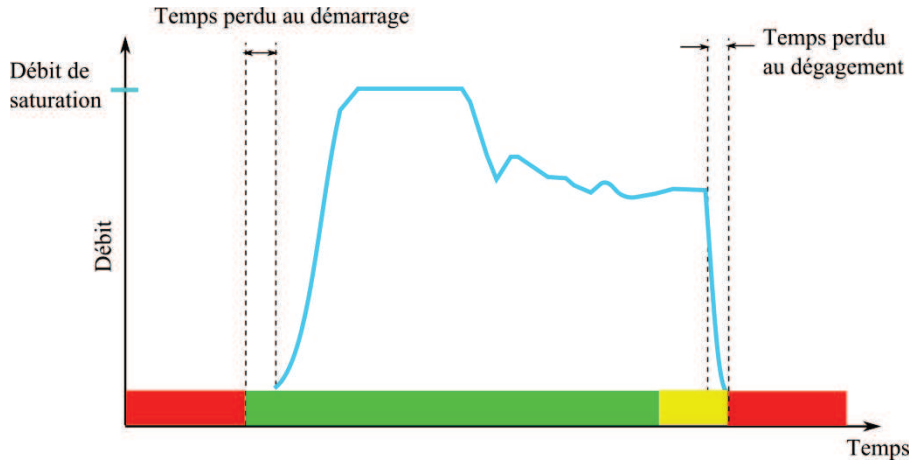


Figure 2- 5. Évolution du débit effectif pendant le feu vert

Supposons qu'un ensemble de véhicules s'est arrêté avant la zone de conflit à cause du feu rouge. Après le passage au feu vert, il faut quelques secondes pour que le conducteur du premier véhicule dans la file d'attente réagisse au feu et démarre (Voir Figure 2- 5). Cette période est communément évaluée à environ 2 secondes [FHWA 2005]. Elle est appelée le ***temps perdu au démarrage*** [H. Gartner, J. Messer et al. 1992]. Après le passage du quatrième véhicule dans la file d'attente, le débit tend à se stabiliser au débit de saturation. Ce débit est généralement soutenu jusqu'à ce que le dernier véhicule de la file d'attente quitte l'intersection. Enfin, le débit revient au débit d'entrée des véhicules q_i avant de s'annuler au moment du passage au feu rouge, ce qu'on appelle le ***temps perdu au dégagement*** [Garber et Hoel 1997].

Cette description communément admise du comportement des véhicules doit être traduite sous la forme de relations entre les évènements observés par les marqueurs de position. La Figure 2-6 nous donne les observations du deuxième marqueur de position de la rue R_i. Nous constatons que deux contraintes peuvent être définies:

- Si deux véhicules proviennent du même courant (voir Figure 2- 7-a), ils sont alors espacés d'au moins d_i secondes. Cette contrainte vise à assurer que chaque véhicule ne heurte pas le véhicule précèdent.

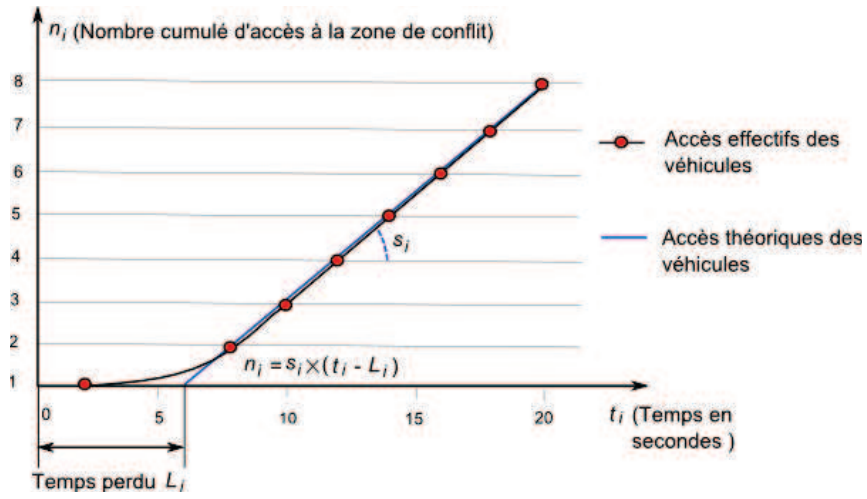


Figure 2- 6. Observations du deuxième marqueur de position

Théoriquement, d_i est déterminé par le temps minimal de réaction des conducteurs et par les systèmes mécaniques et hydrauliques du véhicule pour y répondre. Ici, on donne une borne inférieure de cette valeur comme suit :

$$d_i = \frac{1}{s_i} \tag{2.2}$$

où s_i est le débit de saturation. Nous pouvons admettre qu'en général $d_i \approx 2$ secondes [Garber et Hoel 1997; Chen, Li et al. 2010], ce qui correspond à la législation actuelle en France.

- Si deux véhicules proviennent de deux courants en conflit (voir Figure 2- 7-b), ils sont alors espacés d'un temps L_i supérieur à d_i. Ce temps prend en compte les temps perdus à cause du démarrage et du dégagement du véhicule appartenant au mouvement opposé. Ce temps dépend de la vitesse moyenne des véhicules et de l'aménagement de l'intersection.

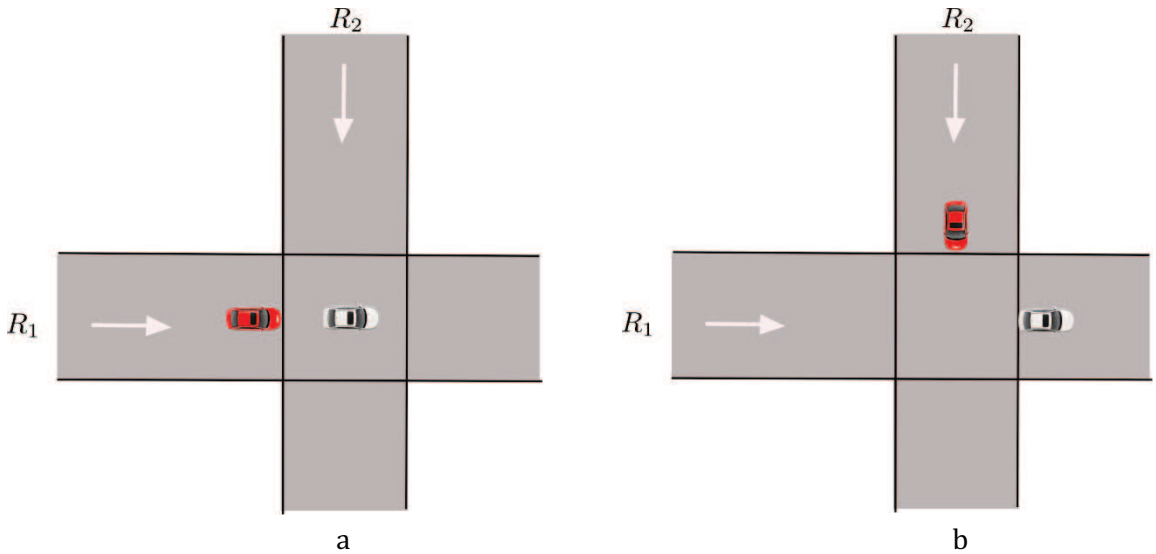


Figure 2- 7. Contraintes temporelles

SVAC a besoin de définir les valeurs de d_i et de L_i pour chaque mouvement. La littérature [Kanaris, Ioannou et al. 1997; Chen, Li et al. 2010] est riche en termes de valeurs, de méthodes et des formules avec des facteurs d'ajustement pour analyser avec précision ces grandeurs ou pour

les mesurer sur le terrain. En effet, les estimations de l'écart de temps inter-véhiculaire et du temps perdu par phase sont nécessaires pour optimiser la régulation d'une intersection à feu classique.

Nous remarquons à partir de ces contraintes que les événements relatifs au départ des véhicules ne sont pas explicitement pris en compte. En ce qui concerne les véhicules appartenant au même mouvement, ils peuvent accéder à la zone de conflit dans la mesure où ils respectent l'écart temps inter-véhiculaire minimal. Lorsque deux véhicules appartiennent respectivement à deux mouvements conflictuels, la contrainte L_i prévoit que ces deux véhicules ne se croisent pas, en théorie. En pratique, c'est la distribution du droit d'accès en fonction de l'observation du troisième marqueur de position qui assure la sécurité du passage du deuxième véhicule.

2.2.2. Modèle RdP de l'intersection

Comme la zone de conflit est un espace conflictuel partagé par les véhicules, la régulation du trafic aux intersections consiste à décider de l'attribution de cette ressource à plusieurs mouvements (véhicules). En ce qui concerne le SVAC, la difficulté centrale se trouve au niveau de la distribution du droit d'utilisation de cet espace à chaque véhicule et non pas à chaque groupe de mouvements. Pour aborder ce problème, il est nécessaire d'utiliser une modélisation adaptée autour du partage de l'espace conflictuel. Ainsi, notre intention d'améliorer la fluidité du trafic se heurte à la quasi-absence de modèles mathématiques adaptés. Afin de s'affranchir de cette difficulté, nous avons utilisé la modélisation présentée dans [Correia, Abbas-Turki et al. 2009]. Ce modèle vise à écrire le Problème de Ressources Partagées Invariantes avec Temps de Configuration (PRPTC) en imposant des contraintes sur les suites qui décrivent les événements observés du système. En outre, nous avons emprunté le modèle d'une rue présenté dans [Corréïa, Abbas-Turki et al. 2006; Corréïa 2007]. Celui-ci a été validé à travers l'évaluation des grandeurs macroscopiques.

Modèle RDP

Sans perte de généralité, nous supposons dans la suite que les deux rues sont similaires, à savoir que $d_1=d_2=d$ et $L_1=L_2=L$. Le modèle RdP est présenté dans la Figure 2- 8. Il est obtenu à partir d'une approche modulaire qui agrège trois sous-modèles. Deux lignes séparent les trois sous-modèles. La figure présente de haut en bas, le sous-modèle de la rue R_1, le sous-modèle du régulateur et le sous-modèle de la rue R_2. Les sous-modèles des rues R_1 et R_2 sont symétriques. Ils décrivent les événements observés par les deux premiers marqueurs de position. Le tir de la transition u_i (respectivement v_i) signifie qu'un véhicule est en train de passer sur le premier (respectivement le deuxième) marqueur de position. τ_i désigne la borne inférieure du temps nécessaire pour parcourir la distance entre les deux marqueurs de position. Le nombre de jetons entre les transitions e_i et v_i correspond au nombre de véhicules qui sont théoriquement prêt à traverser la zone de conflit. N_i est la borne supérieure de la longueur de la file d'attente dans la rue R_i. Le tir de la transition x_i permet d'assurer la sécurité de passage de deux véhicules successifs de la même rue, en respectant la contrainte de l'écart de temps inter-véhiculaire de sécurité.

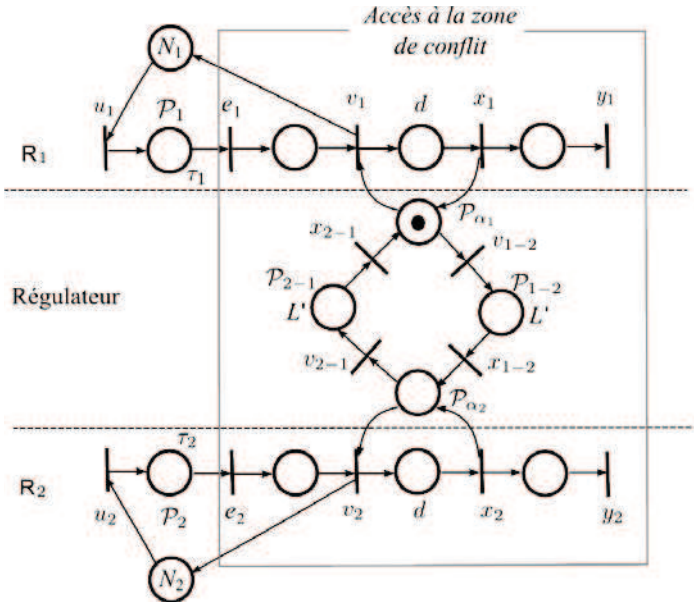


Figure 2- 8. Modèle RdP P-temporisé d'une intersection élémentaire

Le sous-modèle du régulateur s'inspire de la modélisation du PRPTC. Ce modèle empêche deux véhicules appartenant à deux courants conflictuels de traverser l'intersection en même temps. Dans ce modèle, il y a deux places temporisées ($P_{1\text{-}2}$ et $P_{2\text{-}1}$) et deux places immédiates ($P_{\alpha 1}$ et $P_{\alpha 2}$). Le marquage d'une place temporisée $P_{i\text{-}j}$ signifie que le droit de passage sera distribué aux véhicules de la rue R_j. $L' = L - d$ désigne le temps perdu supplémentaires. Comme il y a deux niveaux d'engagement des infrastructures, le marquage d'une place immédiate a deux significations. Dans le cas du SVAC centralisé, le marquage d'une place immédiate représente le fait que l'infrastructure maintient la distribution du droit de passage pour les véhicules du même mouvement. Dans le cas du SVAC décentralisé, le droit de passage est à la disposition des véhicules qui se passent la clé. La signification de chaque transition est détaillée dans le Tableau 2- 1.

Tableau 2- 1. Sémantique des transitions du modèle

Transition	Séquence	Signification
u_i	$u_i(t)$	Le nombre de véhicules entrés dans la rue R_i, jusqu'à l'instant t (ou le nombre de véhicules passés sur le premier marqueur, jusqu'à l'instant t)
e_i	$e_i(t)$	Le nombre de véhicules venant de la rue R_i qui sont prêts à traverser la zone de conflit, jusqu'à l'instant t
v_i	$v_i(t)$	Le nombre de véhicules venant de la rue R_i qui ont accédé à l'intersection jusqu'à l'instant t (ou le nombre de véhicules qui sont passé sur le deuxième marqueur, jusqu'à l'instant t)
x_i	$x_i(t)$	Le nombre de véhicules venant de la rue R_i ayant traversé l'intersection, jusqu'à l'instant t (ou le nombre de véhicules qui sont passé sur le troisième marqueur jusqu'à l'instant t)
$v_{i\text{-}j}$	$v_{i\text{-}j}(t)$	Le nombre de fois que la rue R_i est privée du droit de passage pour la rue R_i jusqu'à l'instant t
$x_{i\text{-}j}$	$x_{i\text{-}j}(t)$	Le nombre de fois que le droit de passage est assigné aux véhicules de la rue R_i jusqu'à l'instant t

Formulation du problème

Le cœur du problème se trouve au niveau du sous-modèle du régulateur. Comme nous l'avons annoncé précédemment, ce sous-modèle décrit le PRPTC avec deux utilisateurs. Nous remarquons qu'il y a deux conflits, le premier est entre les transitions v_1 et $v_{1\text{-}2}$ et le second se situe entre v_2 et $v_{2\text{-}1}$. Le problème est de décider de la séquence des tirs de ces transitions, en fonction des séquences de tir des transitions e_1 et e_2. En reprenant le théorème présenté dans

[Correia, Abbas-Turki et al. 2009] et en l'adoptant à notre cas, on obtient les inégalités suivantes entre les suites qui décrivent le comportement du sous-modèle du régulateur :

$$\boldsymbol{V}(t) \leq \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(t-d) + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sous contraintes

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}(t) \leq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{V}(t) \leq \boldsymbol{E}(t) \end{cases} \tag{2.3}$$

Avec $\boldsymbol{V}(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{E}(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{U}(t) = \begin{bmatrix} v_{1-2}(t) \\ v_{2-1}(t) \end{bmatrix}$ où $e_i(t)$, $v_i(t)$ et $v_{i\text{-}j}(t)$ sont des suites monotones croissantes définies dans le Tableau 2- 1.

Soit la suite $q_i(t)$=$v_i(t)$-$e_i(t)$. La suite $q_i(t)$ nous informe de la longueur de la file d'attente à chaque instant t de la rue R_i. La proposition suivante nous indique la relation entre la durée moyenne d'attente w et $q(t)$:

Proposition 2-1. La durée moyenne d'attente des véhicules sur une période de 0 à *T* est :

$$w = \frac{\sum_{t=0}^{T} \big(q_1(t) + q_2(t)\big)}{e_1(T) + e_2(T)} \tag{2.4}$$

Preuve : selon la formule de Little [Little 1961] on a $w=Q/\lambda$ où Q est la longueur moyenne de la file d'attente et λ le débit d'entrée. De 0 à T, on a $Q = \big(\sum_{t=0}^{T}\big(q_1(t) + q_2(t)\big)\big)/T$ et $\lambda = \big(e_1(T) + e_2(T)\big)/T$ ■

Cette proposition nous informe que le critère de la durée moyenne:

- dépend de la taille instantanée de la file d'attente ;
- impose le choix de l'horizon de temps.

Le choix de l'horizon de temps pose un problème particulier car le calcul des séquences s'effectue instantanément selon les arrivées des véhicules. Afin de faire face à ce problème, nous avons choisi dans la suite deux stratégies différentes adaptées respectivement aux deux niveaux d'implication de l'infrastructure. Dans le cas du régulateur SVAC centralisé, le problème de la régulation du trafic consiste, pour chaque instant t, à vider l'intersection au plus tôt. Ce problème s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} trouver \min_{\sum_{i=1}^{2} q_i(\hat{t})=0} \hat{t} \\ sachant\ e_1(0), \dots, e_1(t) \text{ et } e_2(0), \dots, e_2(t) \\ sous\ le\ système\ d'inéquations\ sous\ contraintes\ (2.3) \end{cases} \tag{2.5}$$

Étant donné que cette approche évacue les véhicules dès que possible, elle prépare une meilleure condition d'accès pour les arrivées futures des véhicules. L'horizon de l'optimisation est variable ($\hat{t}$) qui correspond à l'instant de passage du dernier véhicule par le deuxième marqueur de position. Cependant, un nouveau calcul est requis dès qu'un nouveau véhicule franchit le premier marqueur de position.

La deuxième stratégie consiste à minimiser instantanément $q_1(t)$+$q_2(t)$. Cette stratégie est plutôt adaptée au régulateur SVAC décentralisé où les véhicules ne sont pas en mesure d'être informés

à chaque instant de tous les véhicules arrivant à l'intersection pour calculer une séquence adéquate.

2.3. Régulateur SVAC centralisé

Le régulateur SVAC résout le problème (2.5). La résolution de ce problème se traduit par le calcul d'une séquence qui vide l'intersection au plus tôt. La proposition 2-2 nous donne le nombre de séquences possibles :

Proposition 2-2. Une intersection entre deux rues admet précisément $\left(\sum_{i=1}^{2} n_i\right)!/\prod_{i=1}^{2}(n_i)!$ séquences différentes, où n_i désigne le nombre de véhicules dans la rue R_i avec $\in \{1, 2\}$.

Preuve : Il existe $\left(\sum_{i=1}^{2} n_i\right)!$ séquences de véhicules sans tenir compte des relations de précédence entre les véhicules. Puisque que deux véhicules successifs de la même rue doivent respecter l'ordre de leurs arrivées à la zone de stockage (une voie unique, sans possibilité de dépassement), le nombre de séquences faisables impose la division par $\prod_{i=1}^{2}(n_i)!$. ■

Cette proposition soulève avec précision le problème de l'explosion combinatoire mentionné par [Papageorgiou, Diakaki et al. 2003]. Pour s'affranchir de cette difficulté, nous nous sommes appuyés sur les théories de l'optimisation combinatoire. Plus précisément, nous nous sommes intéressés aux méthodes exactes de résolution des problèmes séquentielles. En effet, résoudre le problème (2.5) implique à chaque étape la résolution soit du conflit entre les transitions v_1 et $v_{1\text{-}2}$ soit celui entre v_2 et $v_{2\text{-}1}$, selon l'état du système. La programmation dynamique est une méthode exacte dédiée à ce type de problème. Elle repose sur le principe d'optimalité de Bellman [Bellman 2003] qui s'énonce de la manière suivante : une sous-trajectoire d'une trajectoire optimale est elle-même optimale pour la fonction d'objectif restreinte aux trajectoires ayant pour origine celle de cette sous-trajectoire [Allaire 2007]. Cependant, pour bénéficier du principe d'optimalité de Bellman, nous avons besoin de [B. Powel 2007; P. Bertsekas 2007; Thomas, Charles et al. 2009] :

- décomposer le problème en sous-problème.
- définir la fonction coût ;
- vérifier le principe d'optimalité de Bellman ;

Ces différents points seront traités dans la partie suivante.

2.3.1. Algorithme de régulation

A partir du modèle RdP de la Figure 2- 8, nous savons que nous devons résoudre soit le conflit entre les transitions v_1 et $v_{1\text{-}2}$ soit celui entre v_2 et $v_{2\text{-}1}$. Nous nous retrouvons face à l'un où l'autre conflit selon si le jeton se trouve dans la place $P_{\alpha 1}$ ou la place $P_{\alpha 2}$. Éliminons maintenant les séquences de franchissement inutiles de $v_{1\text{-}2}$, $x_{1\text{-}2}$, $v_{2\text{-}1}$ et $x_{2\text{-}1}$, à savoir celles constituées exclusivement de franchissements successifs de ces quatre transitions sans aucun franchissement d'une transitions v_i. En gardant seulement les séquences utiles, un jeton qui se trouve dans la place $P_{\alpha i}$ signifie que le dernier véhicule ayant reçu le droit de passage est un véhicule qui provient de la rue R_i. En d'autres termes, à chaque étape nous devons résoudre soit le conflit entre les transitions v_1 et $v_{1\text{-}2}$ soit celui entre v_2 et $v_{2\text{-}1}$, selon si le dernier véhicule autorisé à quitter l'intersection appartient à la rue R_1 ou à la rue R_2.

Ceci nous ramène à la décomposition suivante du problème (2.5) [Wu, Abbas-Turki et al. 2007b; Wu, Abbas-Turki et al. 2007a; Wu, Abbas-Turki et al. 2008]. Soit $e_i(t)=n_i$ qui correspond au nombre de véhicules de la rue R_i théoriquement prêts pour traverser l'intersection durant l'intervalle $[0, t]$. Notons le problème (2.5) par $[n_1,n_2]$. Si $n_1>0$ et $n_2>0$, le problème peut être

décomposé en deux sous problèmes [n_1,n_2,1] et [n_1,n_2,2], où [n_1,n_2,i] signifie que le dernier véhicule qui a été autorisé à traverser l'intersection appartient à la rue R_i. Ainsi, chaque sous-problème peut être décomposé, à son tour, en deux sous-problèmes en supprimant le dernier véhicule autorisé de la séquence originale. Plus précisément, le problème [q_1,q_2,i] avec $(0 \leq q_1 \leq n_1 \wedge 0 \leq q_2 \leq n_2)$ engendre au maximum deux sous-problèmes [m_1,m_2,1] et [m_1,m_2,2], avec :

$$(m_1, m_2) = \begin{cases} (q_1 - 1, q_2) & si \quad i = 1 \quad \wedge \quad q_1 \geq 1 \\ (q_1, q_2 - 1) & si \quad i = 2 \quad \wedge \quad q_2 \geq 1 \end{cases} \tag{2.6}$$

Nous remarquons que la décomposition d'un problème engendre au plus deux sous-problèmes en supprimant le dernier véhicule. La décomposition continue jusqu'à ce que tous les véhicules soient supprimés, afin d'aboutir au problème [0,0][16]. Le processus de décomposition construit un graphe orienté où deux sous-problèmes sont liés si l'un est engendré par l'autre. Dans la suite du document, nous appelons chaque sous-problème « *enfant* », le sous-problème engendré directement par un problème « *parent* ». La Figure 2- 9 nous donne le graphe orienté de la décomposition du problème [2,2].

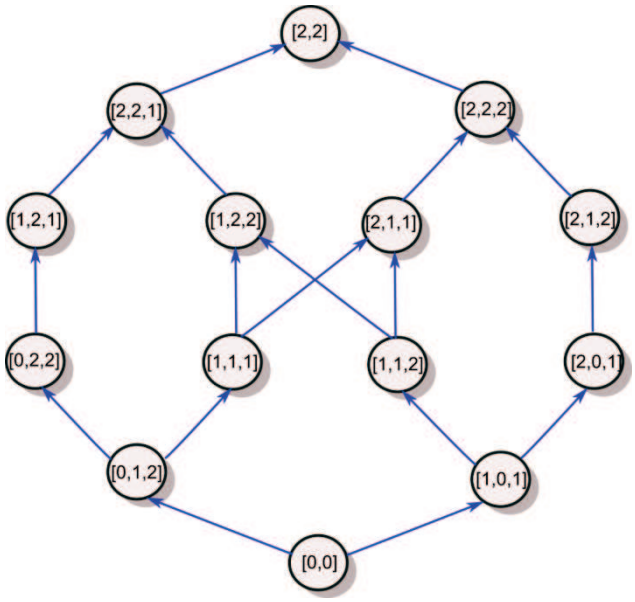


Figure 2- 9. Décomposition du problème [2,2]

Cette décomposition correspond à la décomposition proposée par Potts et Kovalyov [Potts et Kovalyov 2000] pour la résolution du problème d'ordonnancement d'une machine avec un temps de configuration $\left(1 \middle| S_{fg} \middle| \sum W_i C_i\right)$[17] [Brucker 2007]. Cependant, le problème traité ne prend pas en compte les temps de disponibilité des tâches (véhicules) et se limite à un temps d'exécution unitaire, ce qui exige des développements supplémentaires pour valider cette décomposition pour notre application.

Étant donnés le problème (2.5) et sa décomposition (2.6), nous définissons le coût du problème comme étant le temps estimé du passage du dernier véhicule autorisé de la séquence par le deuxième marqueur de position. Afin de donner l'expression de la fonction coût, nous

[16] Si la zone de conflit est vide à l'état initial

[17] La notation à trois champs $1|S_{fg}|\sum W_i C_i$ à la manière synthétique est utilisée pour représenter un problème d'ordonnancement : le premier champ décrire l'environnement des machines (1 : une machine), le second désigne les contraintes liées à l'exécution des tâches (S_{fg} : un temps ***setup*** indépendant de la machine) , le dernier définit le critère d'optimisation ($\sum W_i C_i$: minimiser la somme pondérée des fins de tâche).

considérons tout d'abord le graphe de décomposition $G = (S, A)$ où S est l'ensemble des sommets et A l'ensemble des arcs orientés. A chaque sommet $s \in S$ correspond un sous-problème et chaque arc orienté lie le sous-problème enfant au sous-problème parent. Nous remarquons qu'il existe un isomorphisme entre les chemins allant du sommet [0,0] au sommet $[n_1,n_2]$ et les séquences de passage de véhicules, montré dans le Tableau 2- 2.

Tableau 2- 2. Isomorphisme entre les séquences de véhicules et les chemins du [0,0] au [2,2]

R_1	R_2	Séquences de passage de véhicules	Chemins du [0,0] au [2,2]
1[18]	2[19]	1>2>4>3	[1,0,1]-[1,1,2]-[1,2,2]-[2,2,1]
3[20]	4[21]	1>2>3>4	[1,0,1]-[1,1,2]-[2,1,1]-[2,2,2]
		1>3>2>4	[1,0,1]-[2,0,1]-[2,1,2]-[2,2,2]
		2>4>1>3	[0,1,2]-[0,2,2]-[1,2,1]-[2,2,1]
		2>1>4>3	[0,1,2]-[1,1,1]-[1,2,2]-[2,2,1]
		2>1>3>4	[0,1,2]-[1,1,1]-[2,1,1]-[2,2,2]

En outre, chaque arc orienté suppose une décision prise pour résoudre l'un des deux conflits cités précédemment. Ainsi, nous associons aux arcs les poids relatifs aux durées de disponibilité du jeton de la manière suivante :

$$w(a) = \begin{cases} d & si \quad a \quad lie \quad [m_1, m_2, i] \quad \text{à} \quad [q_1, q_2, i] \\ L & si \quad a \quad lie \quad [m_1, m_2, i] \quad \text{à} \quad [q_1, q_2, j], j \neq i \\ 0 & sinon \end{cases} \tag{2.7}$$

Considérons maintenant la fonction dateur des transitions e_i. Pour éviter toute confusion avec les notations du Tableau 2- 1., cette fonction sera notée $r_{(i,q_i)}$, où l'indice i correspond au numéro de la rue R_i et q_i désigne l'ordre d'arrivée du véhicule dans cette rue. En d'autres termes, $r_{(i,q_i)}$ nous donne la date à laquelle le $q_i$ème véhicule de la rue R_i est théoriquement prêt pour traverser l'intersection. A chaque nœud $[q_1, q_2, i]$ nous associons $r_{(i,q_i)}$. Ainsi, on obtient le graphe présenté dans la Figure 2- 10.

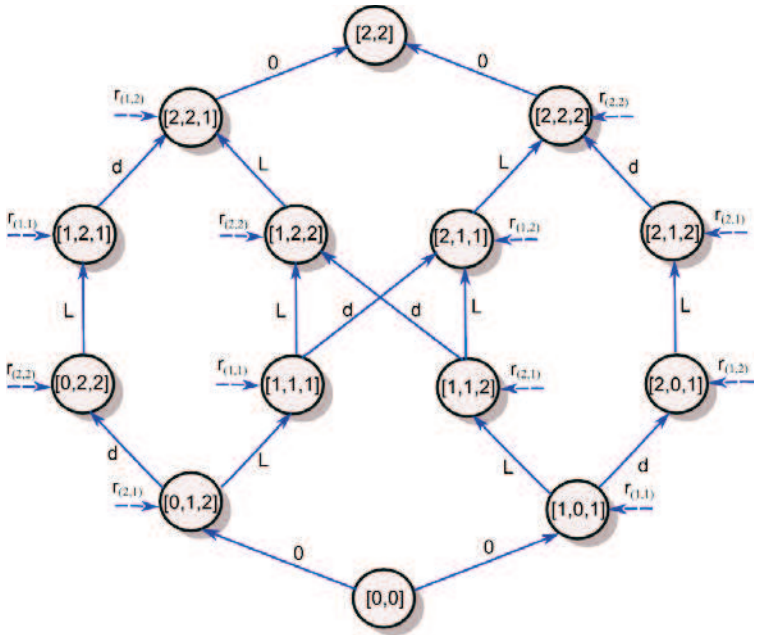


Figure 2- 10. Graphe valué représentant la décomposition du problème [2,2]

[18] Le premier véhicule dans la rue R_1
[19] Le premier véhicule dans la rue R_2
[20] Le second véhicule dans la rue R_1
[21] Le second véhicule dans la rue R_2

Le coût d'un sous problème désigné par le sommet s se définit à partir du coût du sous-problème enfant représenté par le sommet s' de la manière suivante :

$$C(s) = \max\big(C(s') + w(a_{s\prime\to s}), r_{(i,q_i)}\big) \text{ et } C([0,0]) = 0 \tag{2.8}$$

où $a_{s\prime\to s}$ désigne l'arc liant le sommet s' à s.

A partir de (2.8), nous remarquons que le coût de chaque nœud dépend du chemin choisi initialement. Il nous reste maintenant à prouver le principe d'optimalité de Bellman. Soit E_s l'ensemble des enfants de s. Nous présentons le théorème suivant :

Théorème 2-1: Le coût minimal

$$\boldsymbol{C^*(s) = min_{s\prime\in Es}\big(max\big(C^*(s') + w(a_{s\prime\to s}), r_{(i,q_i)}\big)\big)\ \forall s \in S - [0,0]} \tag{2.9}$$

Preuve : Soit $Ch(s') = \{ch_1(s'), \cdots, ch_k(s')\}$ l'ensemble des chemins partant de [0,0] vers s', $C_l(s')$ le coût du chemin $ch_l(s')$ et $C_l(s)$ le coût du chemin partant de [0,0] vers s en passant par s' et en empruntant le chemin $ch_l(s')$, $l \in [1,k]$. Pour prouver le Théorème 2-1, il suffit de prouver que :

$$\text{Si } C_{l_1}(s') \geq C_{l_2}(s') \; alors \; C_{l_1}(s) \geq C_{l_2}(s). \tag{2.10}$$

Où $l_1, l_2 \in [1,k]$

A partir de la relation (2.8), l'assertion (2.10) est toujours vérifiée puisque la soustraction :

$$C_{l_1}(s) - C_{l_2}(s) = \begin{cases} C_{l_1}(s') - C_{l_2}(s') & si \quad r_{(i,q_i)} \leq C_{l_2}(s') + w(a_{s'\to s}) \\ C_{l_1}(s') + w(a_{s'\to s}) - r_{(i,q_i)} & si \quad C_{l_2}(s') + w(a_{s'\to s}) < r_{(i,q_i)} < C_{l_1}(s') + w(a_{s'\to s}). \\ 0 & sinon \end{cases}$$

est toujours supérieure ou égale à zéro.

■

A partir de ce théorème, la solution du problème (2.5) consiste à chercher le plus court chemin entre [0,0] et [n_1,n_2]. La complexité algorithmique dépend du nombre de sommets et d'arcs du graphe. En codant efficacement [S. Hillier et J. Lieberman 1995; P. Miller, F. Vandome et al. 2011] le graphe $G = (S, A)$, il occupe un espace mémoire $\Theta(|S| + |A|)$ et l'algorithme de Bellman se calcule en un temps $\Theta\big(T(|S| + |A|)\big)$ où T est la profondeur du chemin. Dans notre cas :

- T=n_1+n_2+1, puisqu'il s'agit de vider l'ensemble des véhicules présents,
- $|S| = 2(n_1 + 1)(n_2 + 1) - n_1 - n_2$, à cause de la décomposition en sous problèmes.
- $|A| < 2|S|$ car il existe au maximum deux arcs sortant d'un sommet.

Ainsi, si n=n_1+n_2, l'algorithme occupe un espace mémoire inférieur à $\Theta(6(n+1)^2)$ et se calcule en un temps inférieur à $\Theta(6(n+1)^3)$, ce qui implique une complexité polynomiale en fonction du nombre total de véhicules présents. Cependant, grâce à la structure du graphe, le temps de calcul peut être réduit à $\Theta(2|S|)$, en parcourant le graphe dans l'ordre croissant (enfant puis parent), ce qui fait un temps de calcul inférieur à $\Theta(4(n+1)^2)$.

2.3.2. Exemple du fonctionnement du SVAC centralisé

Pour illustrer l'algorithme de régulation présenté précédemment ainsi que le fonctionnement SVAC, nous traitons l'exemple de présence de quatre véhicules à l'intersection élémentaire présentée dans la Figure 2- 1. Nous simulons la cinématique des véhicules à l'aide de la loi de

poursuite donnée dans [Gipps 1981; Gipps 1986], afin de reproduire le comportement de la conduite (le détail de cette loi est présenté dans l'appendice A.1). Sans perte de généralité, nous supposons une flotte homogène, en utilisant les paramètres présentés dans [Panwai et Dia 2005]. Les caractéristiques de l'intersection et des véhicules sont présentés dans le Tableau 2- 3. Nous supposons que d = 2s et que L = 6s.

Tableau 2- 3. Caractéristique des véhicules et de l'intersection

Véhicules		**Intersection**	
Longueur	4-5 m	Longueur de la zone de stockage	105 m
Temps de réaction	1 s	Largeur de la rue	3,5 m
Accélération de confort	2 ms^{-2}	Conditions climatiques	Chaussée sèche
Décélération de confort	-2 ms^{-2}	Coefficient d'adhérence	0,8
Vitesse maximale	15 ms^{-1}	Débit de saturation	0,5 $u.v.p/s$

Supposons maintenant qu'à l'instant initial deux véhicules sont détectés au niveau des deux premiers marqueurs de position et que deux autres véhicules sont dans la zone de conflit et ne disposent pas encore de droit de passage. Les deux premiers véhicules déjà présents sont respectivement détectés par les deux premiers marqueurs de position depuis au moins 7 s et depuis exactement 3s. Puisque τ = 7 s, nous avons $r_{(1,1)} = 0$ s et $r_{(2,1)} = 4$ s. Nous avons aussi, $r_{(i,2)} = 7$ s avec i=1,2 en ce qui concerne les deux véhicules qui viennent d'arriver.

Tableau 2- 4. Données du problème

Rues	$r_{(i,q_i)}$	τ_i	d_i	L_i
R_1	0s / 7s	7s	2s	6s
R_2	4s / 7s	7s	2s	6s

A leur passage au niveau du premier marqueur de position, les véhicules sont identifiés. Ici, nous utilisons les nombres de 1 à 4 pour distinguer les véhicules qui se disputent l'espace de conflit. L'intersection a donc affecté 1 et 3 aux véhicules qui traversent la rue R_1 dans l'ordre de leur arrivée et 2 et 4 aux véhicules qui traversent la rue opposée.

Selon les notations utilisées précédemment, l'infrastructure doit traiter le problème [2,2] avec les valeurs $r_{(i,q_i)}$, d et L rappelés dans le Tableau 2- 4. La représentation graphique du problème est donnée dans la Figure 2- 11. Représentation graphique de la résolution du problème de régulation. Sur cette figure nous pouvons identifier la séquence optimale. Cette séquence est extraite du plus court chemin entre [0,0] et [2,2] en sélectionnant les sommets grâce à la formule (2.9). Le coût minimal de chaque sommet est donné en rouge. Par exemple, pour le sous problème [1,2,2], nous avons :

$$C^*(1,2,2) = \min\begin{pmatrix}\max(C^*(1,1,1)+6,4)\\ \max(C^*(1,1,2)+2,4)\end{pmatrix} = \min\begin{pmatrix}16\\8\end{pmatrix} = 8 \text{ s}$$

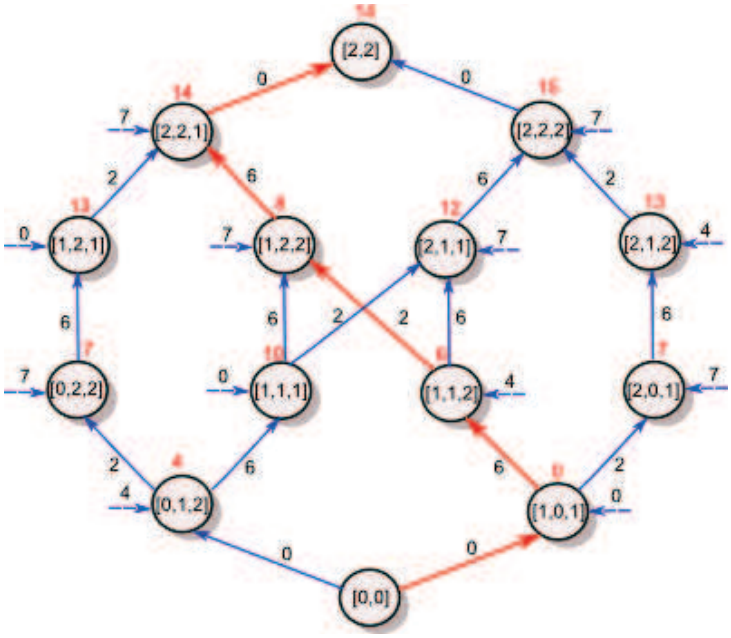


Figure 2- 11. Représentation graphique de la résolution du problème de régulation

Le plus court chemin est représenté par les arcs en rouge. La séquence optimale est représentée dans la Figure 2- 12. Elle consiste tout d'abord à envoyer le droit de passage au premier véhicule de la rue R_1. Lorsque celui-ci passe par le troisième marqueur de position, les droits de passage sont envoyés aux deux véhicules de la rue R_2. Enfin, le dernier véhicule de la rue R_1 peut traverser l'intersection.

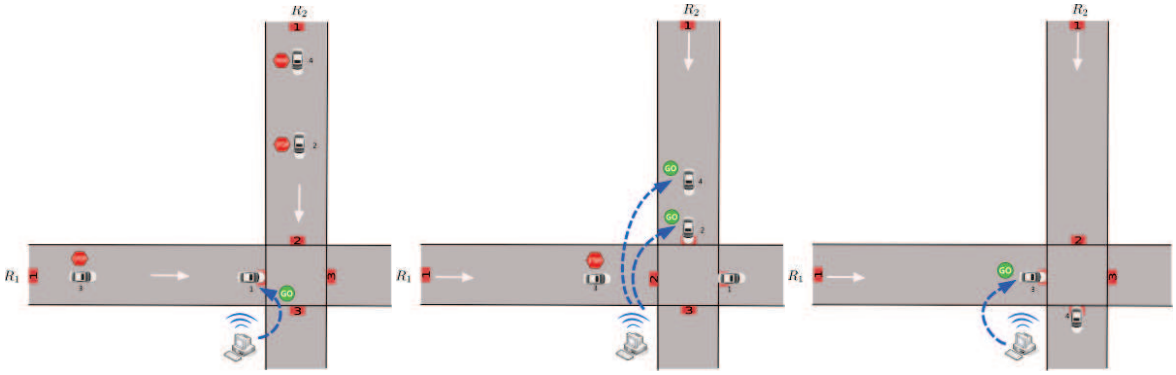


Figure 2- 12. Séquence optimale de passage des véhicules

Afin de vérifier qu'il s'agit réellement de la séquence optimale, le comportement des quatre véhicules est simulé en considérant toutes les séquences possibles montrées dans le Tableau 2- 2. Ces simulations sont représentées dans la Figure 2- 13. Nous pouvons noter que le temps d'évacuation peut être réduit si le dernier véhicule quitte l'intersection plus tôt que prévu car le troisième marqueur de position permet de vérifier l'état de la zone de conflit. Ici le temps gagné est de 4 secondes, à savoir 10 secondes au lieu de 14 secondes prévues par l'algorithme. Ceci est dû à une surévaluation du temps perdu pendant le changement de phase. Malgré cette surévaluation, la séquence optimisée à partir du modèle est celle qui vide l'intersection au plus tôt.

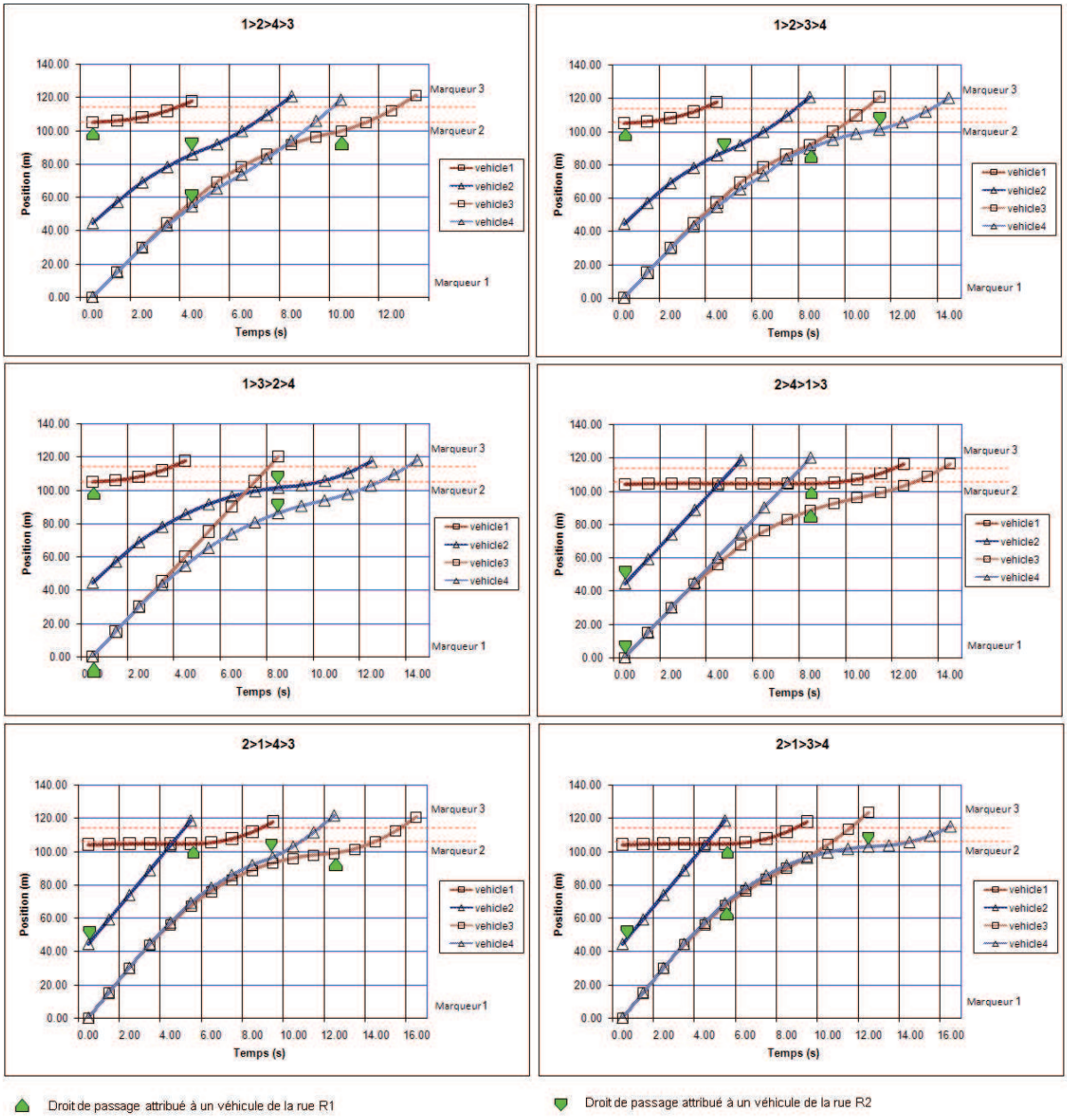


Figure 2- 13. Simulation microscopique de toutes les séquences admissibles

2.3.3. Exemple d'une intersection autonome

Dans cette partie, nous étendons le SVAC centralisé aux véhicules qui traversent l'intersection d'une manière autonome. Ces véhicules disposent d'une plus grande précision au niveau du système de positionnement. Nous supposons qu'ils sont dotés de la technologie RTK (Real Time Kinetic) où une station est disponible au niveau de l'infrastructure pour corriger en temps réel l'évaluation de leur position. En ce qui concerne la conduite, les véhicules sont équipés d'un RAV et de capteurs frontaux de détection d'obstacle.

Dans ce cas, l'infrastructure est en mesure de connaître avec une grande précision la cinématique de chaque véhicule. Il s'agit de communiquer les fonctions utilisées par le RAV. Puisque les véhicules peuvent traverser l'intersection de façon autonome, il n'existe aucun droit de passage envoyé aux véhicules. Cependant, l'infrastructure relie chaque paire de deux véhicules successifs de la séquence calculée. Ainsi les communications V2I et V2V sont utilisés. Chaque véhicule connaît en avance quel véhicule va traverser la zone de conflit avant lui. Chaque

véhicule précédent transmet périodiquement son profil de vitesse au véhicule qui traverse l'intersection juste après lui. Le véhicule suiveur se déplace en ajustant sa vitesse pour maintenir l'écart de temps inter-véhiculaire de sécurité, afin d'éviter de heurter le véhicule précédent. Dans la suite nous supposons que cet écart de temps doit permettre au conducteur de réagir en cas de défaillance du système, ce qui nous impose un écart de temps au moins égal à l'écart de temps inter-véhiculaire adopté par les conducteurs.

Dans ce scénario, l'infrastructure doit déterminer une séquence optimale de passage des véhicules. Pour ce faire, nous utilisons l'algorithme proposé dans la partie 2.4.1. En effet, le même graphe de décomposition peut être construit, comme le montre la Figure 2- 14. Dans ce graphe, on estime le temps de passage des véhicules par le troisième marqueur de position. Ainsi, il est important d'évaluer avec précision le poids des arcs qui est égal à la différence des temps de sortie (le temps du passage sur le troisième marqueur) de deux véhicules qui traversent la zone de conflit successivement. Nous supposons que la loi de poursuite utilisée est celle présentée dans [Panwai et Dia 2005]. Celle-ci nous donne le comportement du RAV embarqué. Ainsi, on peut calculer, à chaque nœud, le comportement du dernier véhicule seulement en fonction du véhicule qui précède.

L'algorithme commence à partir du nœud [0,0] et calcule le poids de chaque arc allant de l'enfant vers le parent. Le poids de l'arc est évalué en simulant le comportement du véhicule ajouté dans le sous-problème parent en fonction de la cinématique du dernier véhicule du sous-problème enfant. Lorsqu'un sous-problème est parent de deux enfants, l'équation (2.9) est appliquée sans prendre en compte $r_{(i,q_i)}$. Plus précisément, seulement le comportement qui permet au dernier véhicule parent de sortir le plus tôt est retenu. Procédant ainsi par élimination nous obtenons l'ordre optimal de sortie des véhicules. En effet, le principe d'optimalité de Bellman est vérifié d'une manière évidente, puisqu'un véhicule qui suit un véhicule plus rapide sortira plus tôt qu'un véhicule qui suit un véhicule plus lent et ainsi de suite. L'algorithme calcule ainsi le plus court chemin du nœud [0,0] jusqu'au nœud [n_1,n_2] en mémorisant pour chaque nœud visité le profil de vitesse d'un seul véhicule. Lorsque tous les sous-problèmes parents d'un nœud sont traités, le profil associé au nœud est détruit.

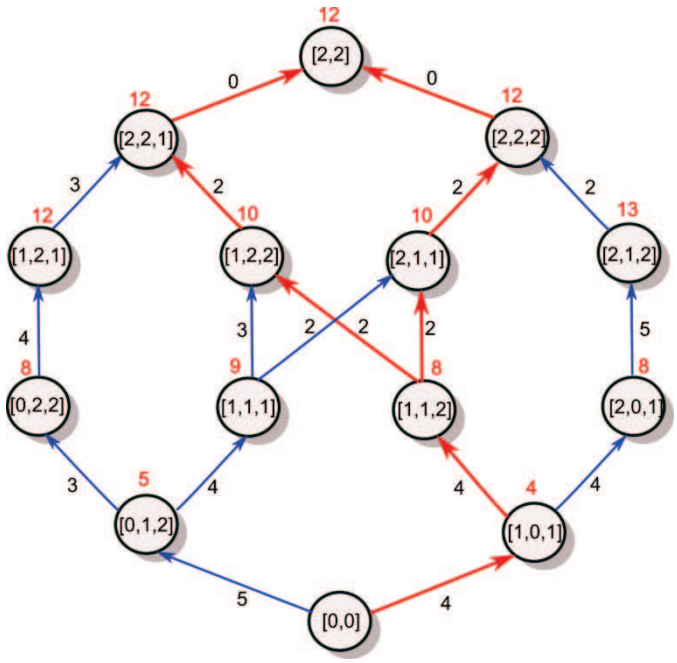


Figure 2- 14. Graphe représentatif du déroulement de l'algorithme dans le cadre de l'intersection autonome

Appliquons cet algorithme aux quatre véhicules présentés précédemment. Nous gardons les mêmes nombres affectés aux véhicules. La Figure 2- 14 donne le graphe de décomposition obtenu ainsi que les deux séquences optimales. Prenons l'exemple du sous problème [1,2,2] dans la Figure 2- 14 il y a deux profils de vitesse réalisables pour le véhicule 4. Dans la première possibilité, le véhicule 4 suit le véhicule 1 qui est le dernier véhicule dans la séquence de [1,1,1]. Dans le second, le véhicule 4 suit le véhicule 2 qui est le dernier véhicule dans la séquence de [1,1,2]. Puisqu'à chaque étape, l'algorithme ne conserve que le scénario qui fournit le temps minimum de sortie, nous gardons seulement le profil de vitesse du véhicule 4 qui suit le véhicule 2 pour le nœud [1,2,2]. L'évaluation de ce temps est associée au nœud, représentée ici par le nombre rouge et le scénario retenu est indiqué par l'arc en amont de couleur rouge.

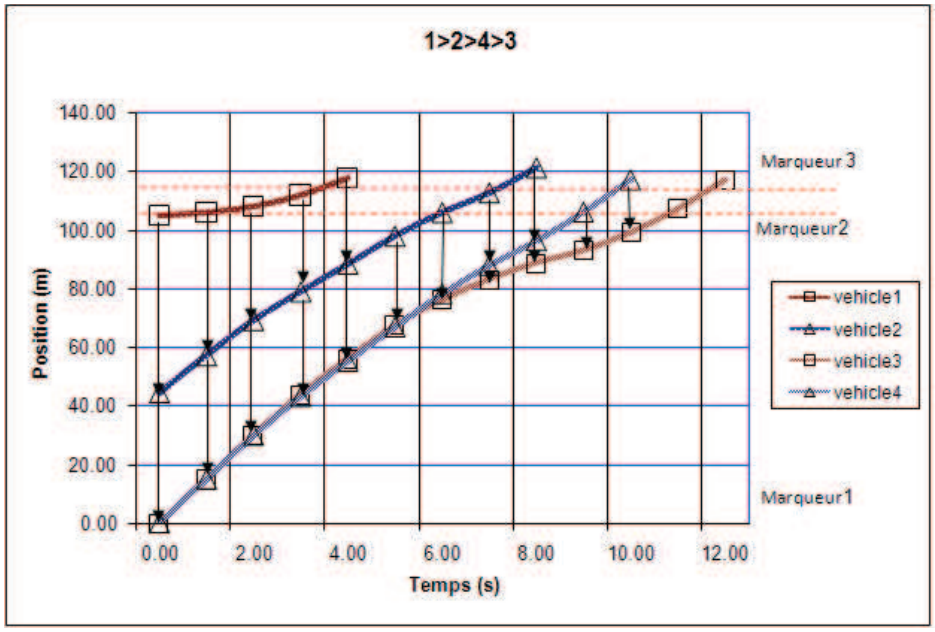


Figure 2- 15. Les comportements des véhicules dans l'intersection autonome

La Figure 2- 15 représente la simulation microscopique du déroulement de la séquence retenue. Nous remarquons que la durée d'évacuation des véhicules dans ce scénario est inférieure de deux secondes à la durée obtenue précédemment. Ceci est dû au gain de temps réalisé en bénéficiant des deux points suivants :

- Joindre chaque paire de véhicules successifs ;
- Disposer d'un supplément d'information sur le comportement des véhicules.

Ces deux points sont seulement réalisables dans le cadre de véhicules autonomes.

2.4. Régulateur SVAC décentralisé

Le calcul des séquences est entièrement effectué par l'intersection dans le cas du régulateur SVAC centralisé. Dans le cas du régulateur SVAC décentralisé l'infrastructure a un rôle moins important. Ce sont les véhicules qui sont essentiellement en charge de distribuer les clés aux autres véhicules selon des règles prédéfinies. Dans cette section, nous expliquons en détail ces règles après l'étude de la minimisation instantanée de la longueur de la file d'attente.

2.4.1. Minimisation instantanée de la longueur de la file d'attente

Nous proposons de simplifier le problème en supposant que le système doit être occupé en permanence, soit parce qu'un véhicule est en train de traverser la zone de conflit, soit parce

qu'un temps démarrage est nécessaire pour accéder à la zone de conflit. Ce fonctionnement peut être décrit à partir de (2.3) de la manière suivante :

$$\boldsymbol{V}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(t-d) + \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sous contraintes (2.11)

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}(t) \leq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{V}(t) \leq \boldsymbol{E}(t) \end{cases}$$

Cette écriture correspond à un fonctionnement à vitesse maximale en concordance avec l'esprit de la littérature de la modélisation des RdPs [Baccelli, Cohen et al. 1992]. Ce fonctionnement force le système à distribuer le droit de passage au véhicule de la voie opposée si aucun véhicule n'est prêt à traverser la zone de conflit. Ainsi l'égalité permet de résoudre le conflit seulement dans des cas précis en imposant le franchissement des transitions v_{1-2} et v_{2-1}. En effet, le conflit persiste lorsqu'au moment du départ d'un véhicule, chaque voie contient un véhicule prêt à traverser la zone de conflit. Pour résoudre ce conflit, nous posons sans perte de généralité que d=1 unité de temps et que $L'=s'd$. La solution de ce conflit est donnée par le lemme suivant :

Lemme 2-1: La solution optimale consiste à privilégier, lorsqu'un choix s'impose, le passage des véhicules suiveurs de la même voie par rapport au passage des véhicules de la voies opposée.

Preuve : Rappelons que l'objectif est celui de minimiser instantanément la longueur de la file d'attente, ce qui revient à minimiser $J(t) = q_1(t) + q_2(t)$ pour tout t. Pour des raisons des simplification de notations nous définissons $\mathcal{V}(t) = v_1(t) + v_2(t)$, $\mathcal{U}(t) = v_{1-2}(t) + v_{2-1}(t)$ et $\mathcal{E}(t) = e_1(t) + e_2(t)$. Il résulte de cette notation que $J(t) = \mathcal{E}(t) - \mathcal{V}(t)$.

La transformée en Z de l'égalité (2.11) nous donne :

$$\begin{bmatrix} 1-z^{-1} & 0 \\ 0 & 1-z^{-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} -1 & z^{-s'} \\ z^{-s'} & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \frac{z}{z-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Ce qui fait :

$$\boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} \frac{-z}{z-1} & \frac{z}{z^{s'}(z-1)} \\ \frac{z}{z^{s'}(z-1)} & \frac{-z}{z-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \frac{z^2}{(z-1)^2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Ce qui implique :

$$\mathcal{V}(z) = z\frac{(z^{-s'}-1)}{(z-1)}\mathcal{U}(z) + \frac{z^2}{(z-1)^2} \quad (2.14)$$

Il résulte de la transformée inverse de (2.14) :

$$\mathcal{V}(t) = -\sum_{i=t-s'+1}^{t} \mathcal{U}(i) + t + 1 \quad (2.15)$$

Puisque $J(t) = \mathcal{E}(t) - \mathcal{V}(t)$, alors

$$J(t) = \mathcal{E}(t) + \sum_{i=t-s'+1}^{t} \mathcal{U}(i) - t - 1 \quad (2.16)$$

Nous constatons que chaque franchissement supplémentaire de v_{1-2} et de v_{2-1} est pénalisant vis-à-vis de la longueur de la file d'attente. ■

Ce lemme signifie que plus la valeur de *s'* est grande, plus il sera nécessaire de distribuer le droit de passage au véhicule suiveur de la même voie. Cependant, comment reconnaître techniquement le véhicule suiveur? La valeur de d nous donne une réponse théorique. Par exemple, si nous supposons que d = 2 s et que la borne supérieure de la vitesse est de 15 m/s, chaque véhicule qui détecte un véhicule qui le précède à une distance inférieure à 30 m, il peut se considérer comme un suiveur. L'ensemble des ces véhicules constitue un peloton. La séquence optimale n'interrompt jamais le mouvement d'un peloton.

Dans la suite nous considérons que chaque véhicule est équipé d'un dispositif de détection de l'espace frontale. Soit *es* la distance détectée par le véhicule. Si ≤ $v_{max} \times d$, le véhicule envoie un message au véhicule précédent pour l'informer qu'il est son suiveur. Des qu'un véhicule suivi déverrouille son droit de passage, il envoie la clé au véhicule suiveur, et ainsi de suite. Le dernier véhicule suiveur transmet la clé à l'infrastructure lors de son passage sur le troisième marqueur de position.

Cette manière de procéder résout partiellement le conflit. En effet, lorsque l'intersection récupère la clé, elle doit décider à quel véhicule envoyer le droit de passage. Nous proposons que la clé soit attribuée au véhicule qui a passé le plus de temps dans la zone de conflit. Cette règle n'est pas nécessairement optimale, mais elle permet aux véhicules arrêtés sur la voie opposée de traverser la zone de conflit.

2.4.2. Algorithme de contrôle

D'après le Lemme 2-1, nous donnons le mode de fonctionnement du SVAC décentralisé. Il est basé sur le V2I et le V2V. En outre, chaque véhicule a besoin d'un dispositif de détection de l'espace inter-véhiculaire afin de déterminer s'il appartient au même peloton. En effet, les véhicules appartenant au même peloton peuvent traverser l'intersection les uns après les autres sans interruption. L'algorithme peut être décrit comme un ensemble de règles :

1. Si l'intersection ne possède pas la clé, elle envoie un droit de passage verrouillé aux véhicules qui viennent de passer par le premier marqueur de position;
2. Si l'intersection possède une clé, elle envoie la clé au premier véhicule qui s'est présenté au premier marqueur de position;
3. Si un véhicule détecte un véhicule précédent à proximité ($es \leq v_{max} \times d$) dans la zone de stockage, il informe le véhicule devant lui qu'ils appartiennent au même peloton.
4. Un ensemble des véhicules proches forment un peloton théorique;
5. Si le véhicule de tête du peloton reçoit une clé, il l'envoie au véhicule juste derrière; la clé est transmise d'un véhicule à son suiveur qui appartient au même peloton ;
6. Le peloton continue à se former jusqu'à ce que le dernier véhicule du peloton passe au-dessus du deuxième marqueur de position;
7. Le dernier véhicule de la section donne la clef à l'infrastructure lorsqu'il passe sur le troisième marqueur de position.

2.4.3. Exemple d'application

Afin d'illustrer le fonctionnement du régulateur SVAC décentralisé, nous appliquons l'algorithme à l'exemple donné précédemment. Il s'agit initialement de quatre véhicules qui se trouvent à des positions initialement différentes dans la zone de stockage (voir Figure 2- 16). Nous supposons qu'au début l'intersection détient la clé, ce qui signifie qu'aucun véhicule n'a le droit d'accès à la zone de conflit. En premier, seul le véhicule 1 obtient la clé puisqu'il est le plus proche de la zone de conflit (Figure 2- 16 (a)). Le véhicule 3 ne peut pas acquérir la clé puisqu'il n'est pas le suiveur du véhicule 1. Après la sortie du véhicule 1, la clé est renvoyée à l'infrastructure (Figure 2- 16 (b)). Étant donné que les véhicules présents ne détiennent pas de clé, l'infrastructure

s'engage à distribuer la clé au véhicule le plus proche, à savoir le véhicule 2 (Figure 2- 16 (c)). Une fois la clé obtenue, le véhicule 2 est capable de distribuer la clé à son suiveur – le véhicule 4 (Figure 2- 16 (d)). Lorsque le véhicule 4 passe sur le troisième marqueur de position (Figure 2- 16 (e)), l'infrastructure récupère la clé et la transmet au véhicule 3 (Figure 2- 16 (f)).

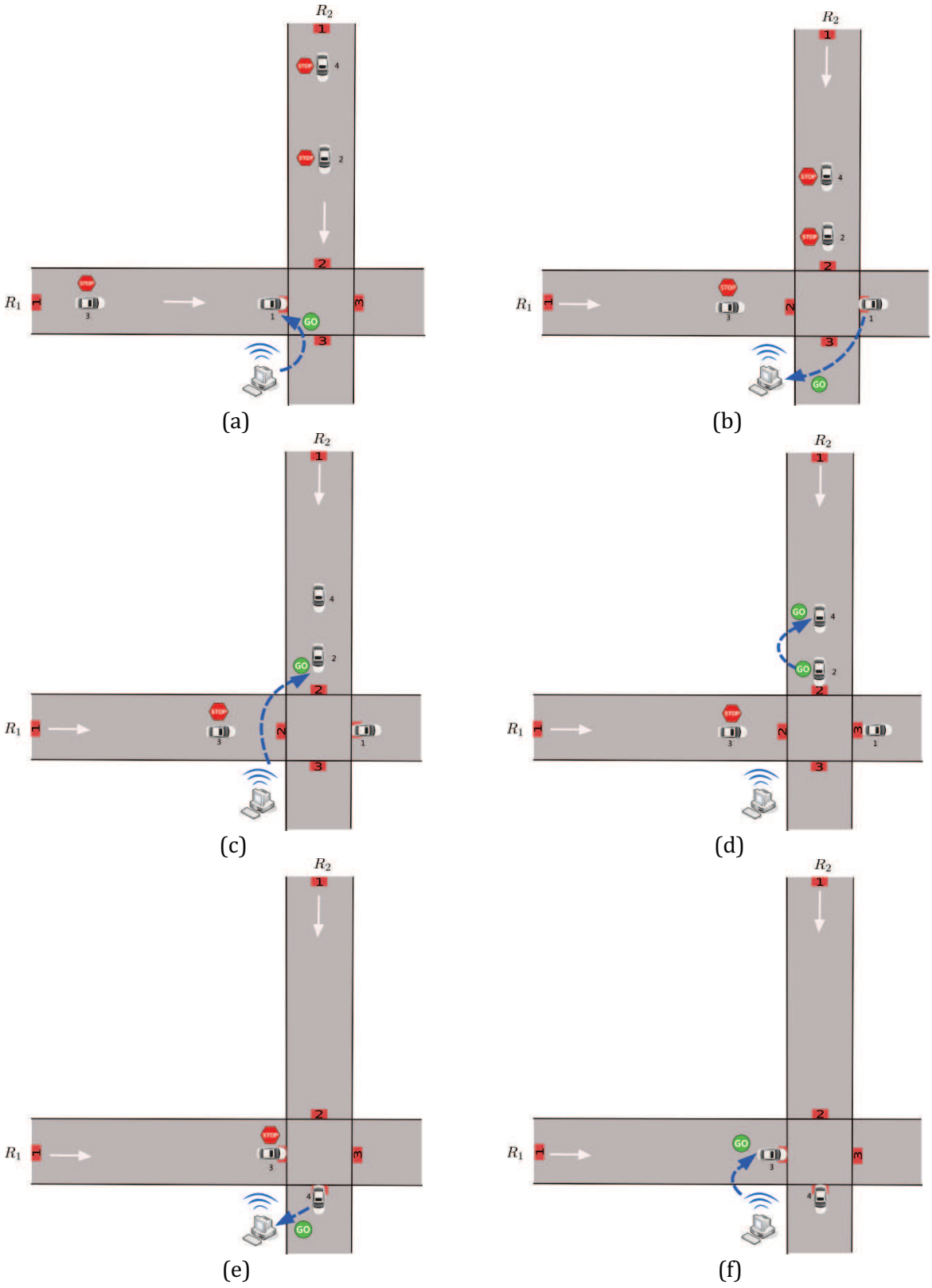


Figure 2- 16. Exemple de fonctionnement du SVAC décentralisé

La décision de transmission de la clé au véhicule 4 est basée sur la détection du véhicule 2 à proximité. Pour aboutir à cette séquence, nous avons dû simuler la cinématique de chaque véhicule. La Figure 2- 17 montre l'évolution dans le temps des trajectoires des véhicules. Nous remarquons que le véhicule 4 et le véhicule 2 forment un peloton à partir de la 4ème seconde de simulation.

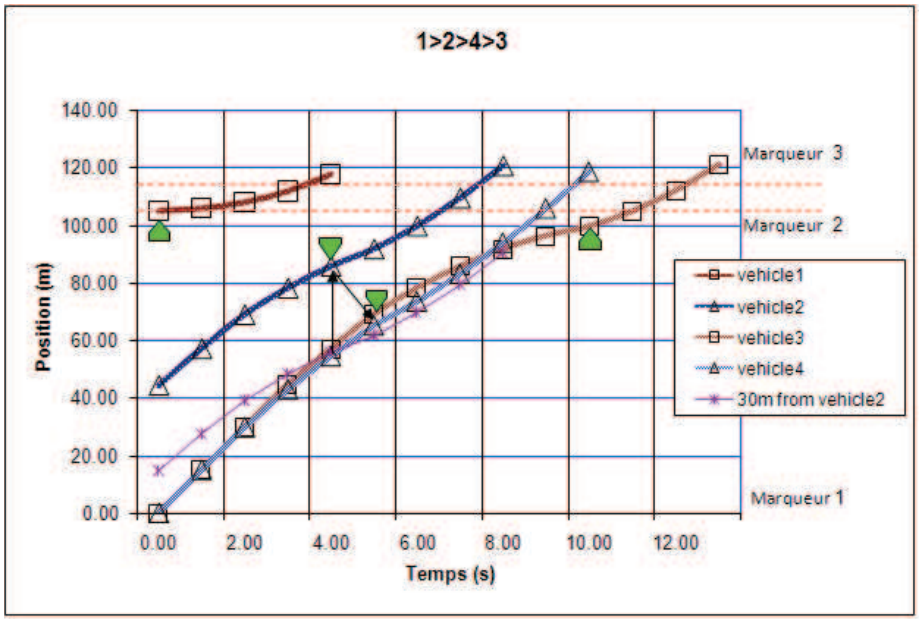


Figure 2- 17. Simulation microscopique du SVAC décentralisé

Nous notons que le régulateur SVAC décentralisé n'est pas gourmand en temps de calcul. En effet, il n'est pas nécessaire de rechercher des informations sur tous les véhicules dans l'intersection et de calculer leur temps d'accès. Toutefois, même si dans cet exemple précis nous avons des résultats similaires aux résultats obtenus par le SVAC centralisé, il existe plusieurs cas où les solutions sont différentes. En effet le SVAC décentralisé est basé sur une approche qui suppose un fonctionnement du modèle RdP à vitesse maximale, ce qui soulève l'interrogation suivante : est-il aussi performant que le SVAC centralisé ? Ainsi dans la suite nous réaliserons plusieurs simulations pour évaluer les approches proposées.

2.5. Résultats de simulation

Valider les deux approches proposées précédemment nécessite plusieurs simulations microscopiques. Ces simulations permettent de donner une indication sur les performances dégagées par les régulateurs SVAC centralisé et décentralisé. En outre, trois familles d'interrogations doivent trouver des éléments de réponses à travers les simulations. La première concerne l'efficacité du régulateur SVAC décentralisé par rapport à celle du régulateur SVAC centralisé dans la mesure où le premier bénéficie d'un algorithme peu gourmand en temps de calcul tandis que le deuxième profite d'un algorithme plus rigoureux. La deuxième famille émane du fait qu'aucune des deux approches du régulateur SVAC proposées ne bénéficie d'un processus de prédiction précise des arrivées futurs de véhicules, à travers des mesures de débit par exemple. Il est ainsi nécessaire de mesurer l'impact d'une telle absence. Enfin, le SVAC est une proposition parmi d'autres qui doit démontrer son efficacité non seulement par rapport à l'approche classique mais aussi par rapport aux nouvelles approches qui tentent d'exploiter les potentialités de la conduite coopérative.

Avant de traiter dans l'ordre ces trois familles d'interrogations, nous allons tout d'abord décrire brièvement l'environnement de simulation.

2.5.1. Environnement de simulation

Nous réalisons les simulations dans un environnement que nous avons développé (Figure 2- 18). Dans cet environnement de simulation, la loi de poursuite [Gipps 1981; Gipps 1986] est appliquée pour simuler le comportement des véhicules. Les arrivées des véhicules obéissent à la loi de Poisson et d'Erlang puisque plusieurs recherches ont souligné que les processus stochastique de Poisson et d'Erlang pourraient être utilisés pour la modélisation des arrivées de véhicules à une intersection [ADAMS 1936; Webster 1958a; Cohen 1993; Chen, Li et al. 2010].

Nous considérons l'intersection élémentaire à deux branches (Figure 2- 19). Les paramètres suivants sont définis : le champ de contrôle (la longueur entre les marqueurs 1 et 2) est de 150 mètres pour chaque rue, le débit maximal est fixé à 1800 *u.v.p.*/heure (0,5 *u.v.p./s*), les intervalles temporels de sécurité d = 2 s et L = 5 s (pour l'algorithme SVAC centralisé). En effet, d s'accorde avec la valeur du débit maximal du trafic. La vitesse maximale autorisée est de 50 km/h et la vitesse souhaitée suit la loi normale avec une moyenne de 50 km/h et un écart type de 5 km/h.

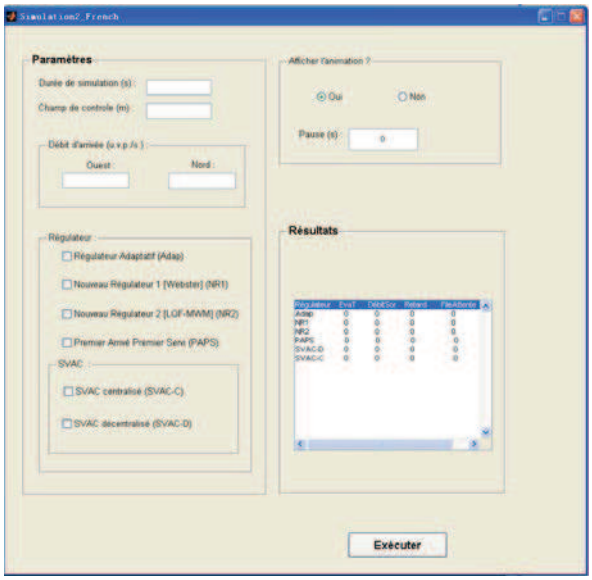


Figure 2- 18. Interface du simulateur

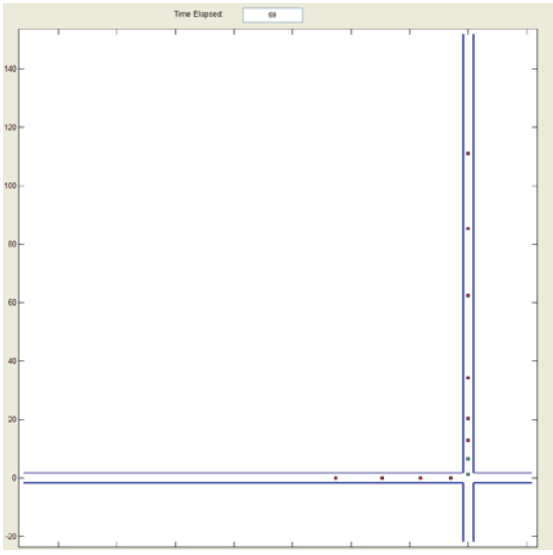


Figure 2- 19. Capture d'écran pendant la simulation

Toutefois, bien que le choix de ces paramètres rejoint plusieurs les travaux de la littérature [Panwai et Dia 2005; Fang et Elefteriadou 2006; Wunderlich, Cuibi et al. 2008], il faut noter que ces valeurs sont arbitraires et ne sont utilisées que pour montrer le fonctionnement de la méthode. Tout autre paramétrage peut être utilisé tant qu'il ne viole pas un minimum de concepts relatif à l'écoulement du trafic.

Nous évaluerons les scénarios selon quatre critères de performance:

- le temps d'évacuation : il s'agit du temps nécessaire pour évacuer tous les véhicules présents pendant une durée fixe. Plus précisément, après une période de simulation, nous calculons le temps nécessaire pour évacuer les véhicules qui sont restés dans l'intersection ;
- le débit de sortie. Il correspond au rapport entre le nombre de véhicules passé sur le deuxième marqueur et le nombre de véhicules passé sur le premier marqueur pendent la durée de simulation ;
- le retard moyen : le retard d'un véhicule est calculé par la différence entre le temps de trajet réel et le temps de trajet théorique pour chaque véhicule. Ensuite, la somme des différences est divisée par le nombre de véhicules observés ;
- la longueur moyenne des files d'attente. Elle est définit par le cumul de nombre de véhicules présents à l'arrêt divisé par le temps de simulation.

2.5.2. Comparaisons entre le SVAC centralisé et le SVAC décentralisé

Le but des simulations est de comparer les deux régulateurs proposés pour savoir si le régulateur SVAC décentralisé est suffisamment efficace pour contrôler le trafic. Cette information est très importante d'un point de vue pratique. En effet, si le régulateur SVAC décentralisé est aussi efficace que le régulateur SVAC centralisé, il est préférable d'utiliser une méthode simple au lieu d'un algorithme plus complexe.

Nous présentons ci-dessous les figures comparatives des deux approches selon chacun des quatre critères d'évaluation (voir Figure 2- 20, Figure 2- 21, Figure 2- 22 et Figure 2- 23). Chaque point représente une moyenne de dix simulations indépendantes où chaque simulation fonctionne pendant 60 minutes.

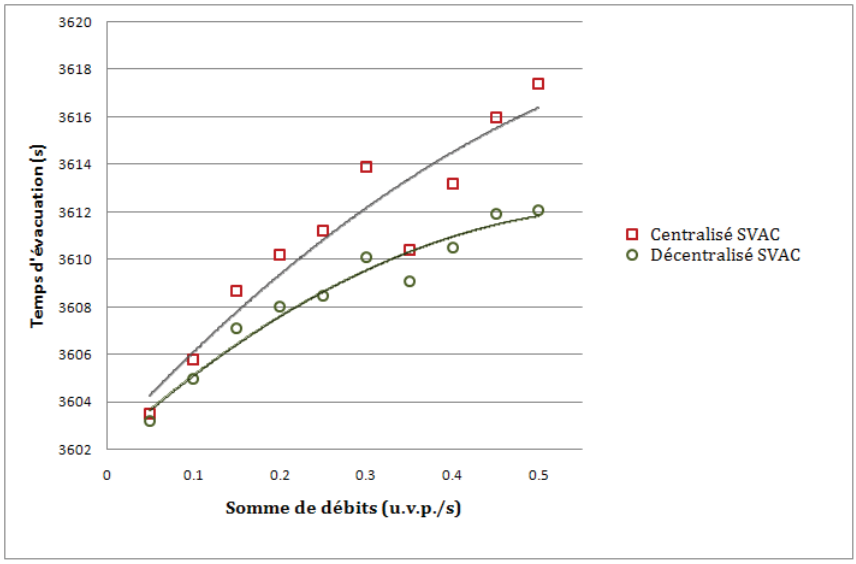


Figure 2- 20. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules (SVAC centralisé, SVAC décentralisé)

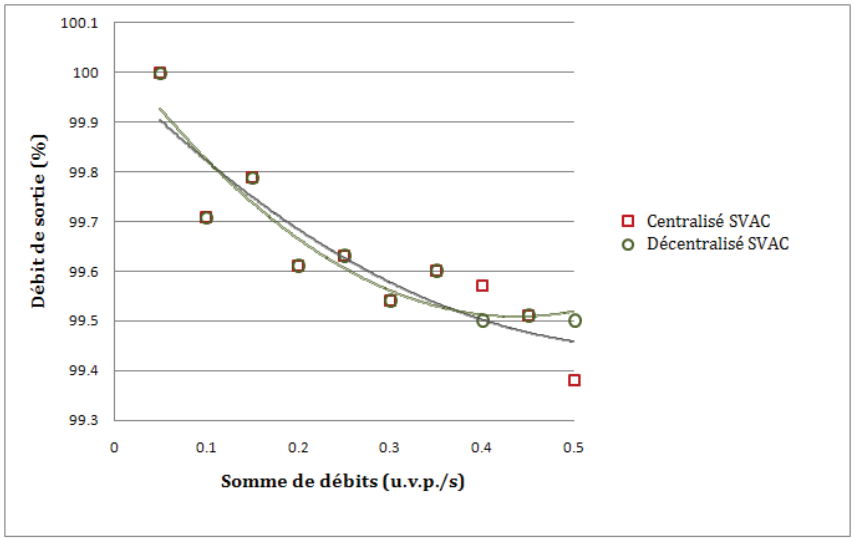


Figure 2- 21. Comparaison des débits de sortie de véhicules (SVAC centralisé, SVAC décentralisé)

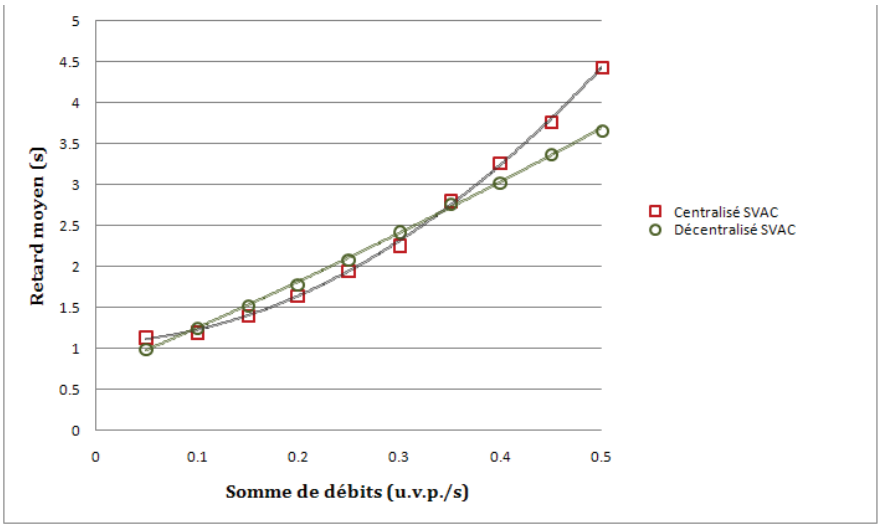


Figure 2- 22. Comparaison du retard moyen (SVAC centralisé, SVAC décentralisé)

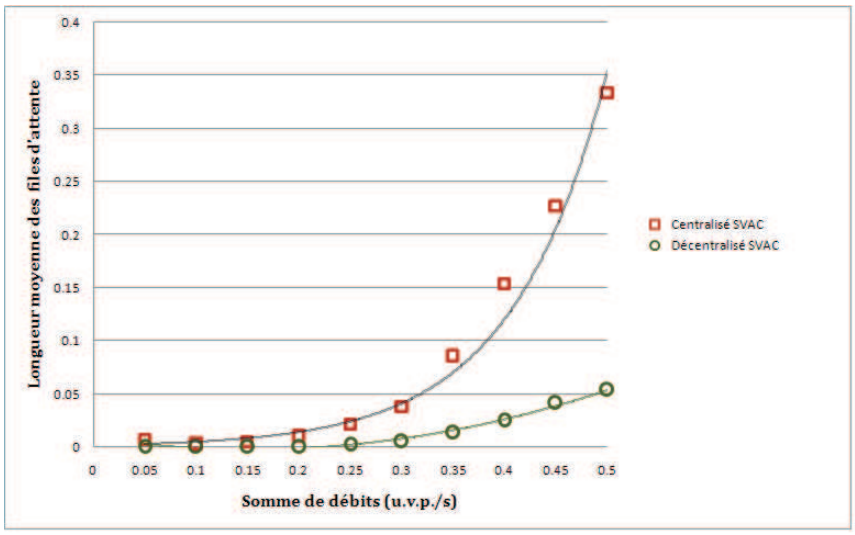


Figure 2- 23. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente (SVAC centralisé, SVAC décentralisé)

Nous observons que les performances des deux approches sont quasiment similaires, avec un très léger avantage pour le régulateur SVAC décentralisé en général. Néanmoins cet avantage reste minime, ce qui ne nous permet de distinguer les deux approches appliquées à une intersection élémentaire. Ainsi, nous pouvons seulement conclure que le régulateur SVAC décentralisé est aussi efficace que le régulateur SVAC centralisé dans le cas d'une intersection élémentaire. Cependant, il faut vérifier la conservation de cette propriété pour des intersections complexes. Il faut aussi comparer ces performances avec les performances des autres approches.

2.5.3. Impact de la prévision du trafic

Rappelons que les deux régulateurs SVAC ne prennent pas en compte les prévisions du volume du trafic. Ils observent seulement les véhicules présents au niveau de l'intersection et régulent le trafic en fonction. Supposons maintenant l'existence d'un régulateur visionnaire. Il s'agit d'un régulateur qui connaît avec exactitude les horaires des futures arrivées des véhicules sur un horizon de 4 minutes. Il peut ainsi optimiser les temps de sortie de l'ensemble des véhicules sur cet horizon en utilisant l'algorithme déduit du Théorème 2-1. Nous signalons que ce régulateur est purement théorique.

Ce régulateur est confronté aux deux régulateurs SVAC. Cependant pour la simulation, nous avons utilisé un comportement de véhicules prévisibles selon le modèle RdP au lieu d'utiliser la loi de poursuite comme c'était le cas précédemment. Ceci a pour objectif de permettre au régulateur optimal global de prévoir avec exactitude le comportement des véhicules, ce qui rend la solution obtenue optimale.

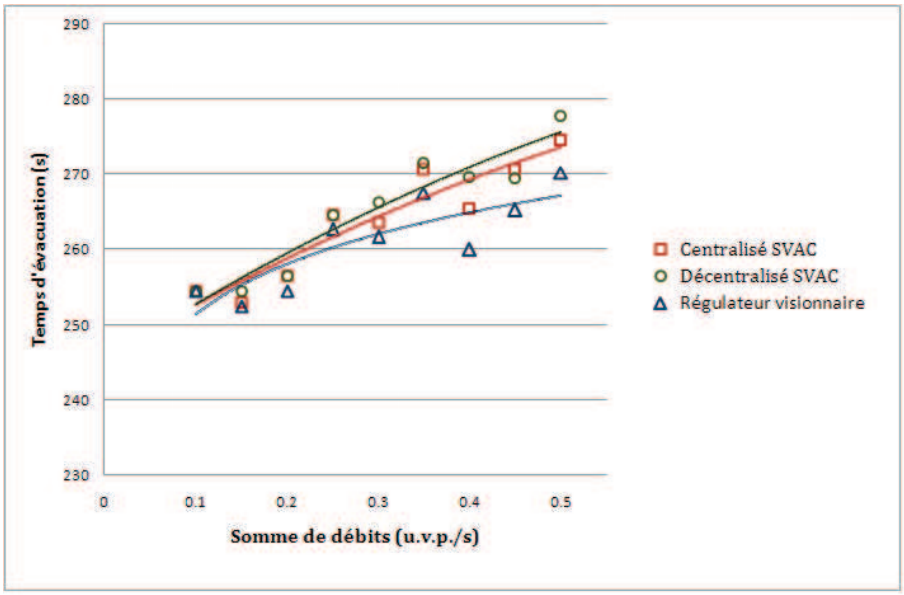


Figure 2- 24. Comparaison des temps d'évacuation à base du modèle RdP

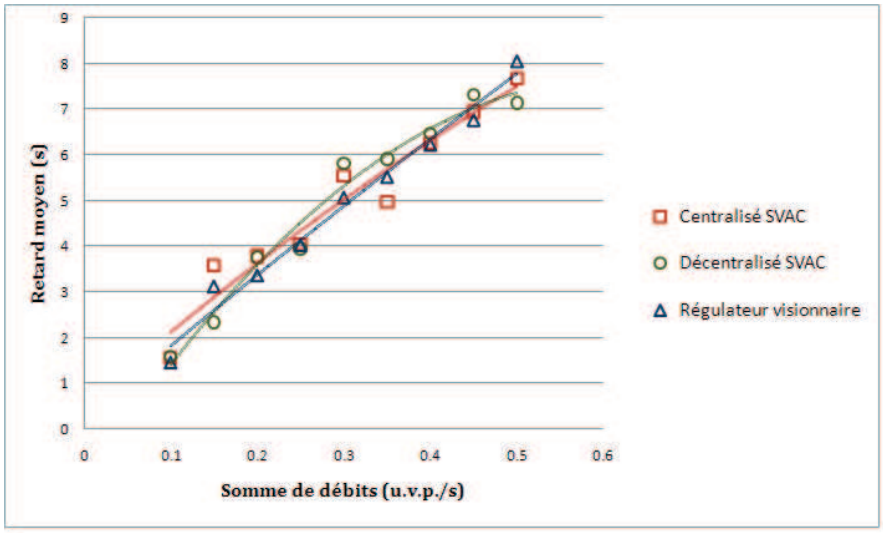


Figure 2- 25. Comparaison du retard moyen à base du modèle RdP

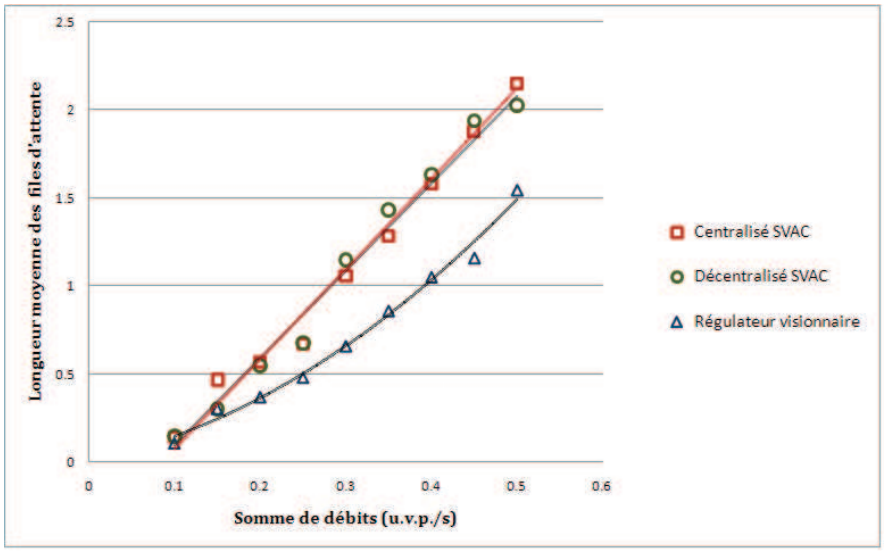


Figure 2- 26. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente à base du modèle RdP

Pour chaque simulation les dates d'arrivée de véhicules sont générées aléatoirement pour les prochaines 4 minutes. Le régulateur visionnaire calcule la séquence qui permet de vider l'intersection le plus tôt possible. Il s'agit d'un optimale global pour les 4 minutes de simulation. Les régulateurs SVAC centralisés et décentralisés observent les arrivées de véhicules seulement à partir des premiers marqueurs de position. Ils ne sont au courant des arrivées de véhicules qu'à partir du moment où ces véhicules accèdent à la zone de stockage.

Nous avons comparé les performances issues du régulateur visionnaire aux performances des deux approches SVAC. Nous remarquons à partir des figures : Figure 2- 24, Figure 2- 25 et Figure 2- 26; que la prévision du trafic (optimisation globale) peut permettre un léger gain en termes de la longueur moyenne des files d'attente et du temps nécessaire pour vider l'intersection. Néanmoins, ce gain peut être relativisé car la différence des résultats entre les performances des trois approches restent très faible. En outre, le régulateur visionnaire ne réduit pas le temps d'attente moyen. Nous pouvons ainsi conclure que le fait de prévoir le trafic ne permet pas des gains significatifs.

Nous remarquons que le fait de simuler le trafic par le modèle RdP ne conserve pas l'avantage du régulateur SVAC décentralisé sur le régulateur SVAC centralisé. Cet avantage observé

précédemment est dû ainsi au fait que le régulateur SVAC centralisé dépend de l'estimation du temps perdu contrairement ou régulateur SVAC décentralisé qui réagit efficacement dans toutes les circonstances quand le temps perdu est supérieur à l'écart de temps inter-véhiculaire.

2.5.4. Comparaison du SVAC avec d'autres approches.

Dans cette partie, nous comparons les performances du système proposé avec d'autres approches. Ces approches englobent la régulation adaptative présentée dans le chapitre précédent ainsi que deux approches futuristes basées sur la communication sans-fil présentées dans la littérature. La régulation adaptive s'appuie sur les relevés des boucles électromagnétiques. Puisque plusieurs stratégies adaptatives existent dans la littérature, nous avons choisi celle donnée dans [Fang et Elefteriadou 2006]. Celle-ci a l'avantage d'être la plus récente et la mieux adaptée aux intersections isolées comme le témoigne les comparaisons réalisées par les auteurs à travers la simulation microscopique.

En ce concerne la régulation à base de la communication sans fil (notée NR), nous avons simulé la méthode proposée par Wunderlich [Wunderlich, Cuibi et al. 2008] et celle par Gradinescu [Gradinescu, Gorgorin et al. 2007]. Nous avons ignoré le système de réservation pour les véhicules autonomes [Dresner 2009; Dresner et Stone 2008b] car il ne prend pas en compte l'écart de temps inter-véhiculaire de sécurité entre deux mouvements en conflit. Ce dernier a été remplacé par la séquence PAPS (Premier Arrivé, Premier Servi) appliqué à la boucle de régulation que nous proposons [Mehani et de La Fortelle 2007]. L'utilisation de cet algorithme permet de mettre en exergue l'apport des deux approches d'optimisation proposées, à savoir le régulateur SVAC centralisé et le régulateur SVAC décentralisé.

Dans la méthode de Gradinescu, le contrôleur mesure précisément le volume du trafic en suivant les véhicules dans le champ de couverture des stations CSV. Ensuite, la longueur du cycle est calculée en utilisant la formule de Webster. Nous appelons cette méthode «NR1 Webster» par la suite. En ce qui concerne le contrôle dans [Wunderlich, Cuibi et al. 2008], un algorithme de Longest Queue First Maximal Weight Matching (LQF-MWM) qui part de l'hypothèse de la connaissance des positions des véhicules dans la zone de stockage et de leur destination. Cet algorithme est noté NR2 LQF-MWM.

Nous remarquons à partir de l'ensemble des figures (Figure 2- 27, Figure 2- 28, Figure 2- 29 et Figure 2- 30) que les deux régulateurs SVAC affichent des performances très intéressantes comparativement aux autres approches, ce qui leur procure un avantage certain. Les autres approches se distinguent selon le débit supposé. Lorsque le débit est faible (inférieur à 0,4 *u.v.p./s*) la méthode NR2 LQF-MWM est très avantageuse et affiche des performances intéressantes. Néanmoins, cette approche de régulation ne supporte pas l'augmentation du volume du trafic, ce qui présente un inconvénient en heure de pointe. Les deux autres approches, à savoir le régulateur adaptatif et le régulateur NR1 Webster affichent des performances similaires, avec un léger avantage pour le régulateur adaptatif. Cet avantage peut être expliqué par le rajustement rapide du régulateur adaptatif à temps discret aux variations de la demande.

Rappelons que bien que les approches NR1 Webster et NR2 LQF-MWM soient basées sur la communication sans fil, les boucles de régulation associées conservent le système de signalisation classique, à savoir les feux tricolores. Ainsi, les algorithmes proposés visent à optimiser les durées des phases. En conclusion, nous pouvons déduire que le fait de s'intéresser au calcul des séquences, en s'appuyant sur la signalisation à bord présente un avantage considérable des deux régulateurs proposés. Cette conclusion s'avère vérifiée lorsque le volume du trafic est faible puisque l'algorithme PAPS, bénéficiant de la même boucle de régulation, fournit des performances similaires aux régulateurs SVAC. Lorsque le volume du trafic augmente, les deux approches proposées bénéficient plutôt des méthodes d'optimisation adoptées. Elles

s'avèrent ainsi efficaces pour améliorer les performances du système et pour faire face à l'affluence du trafic.

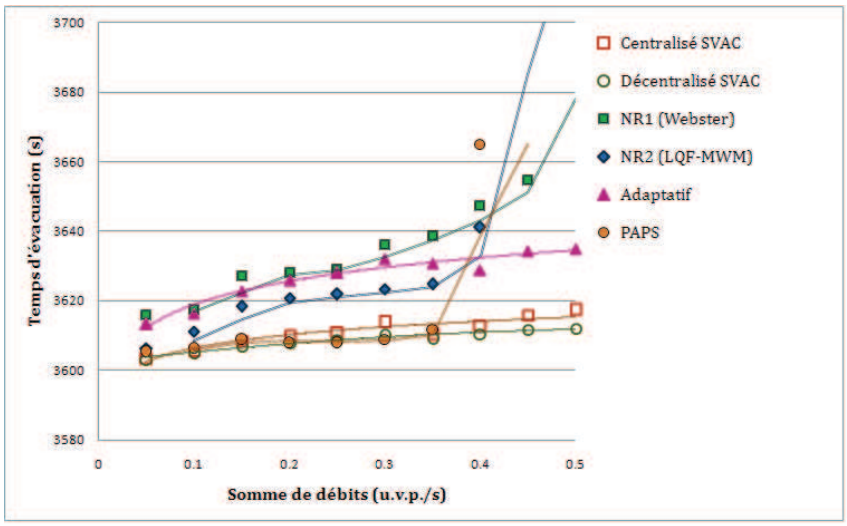


Figure 2- 27. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches

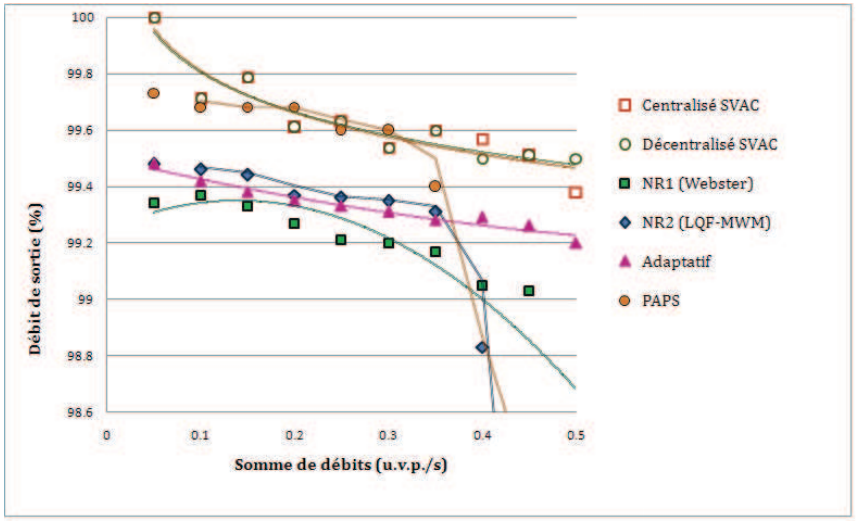


Figure 2- 28. Comparaison des débits de sortie de sortie de véhicules entre les différentes approches

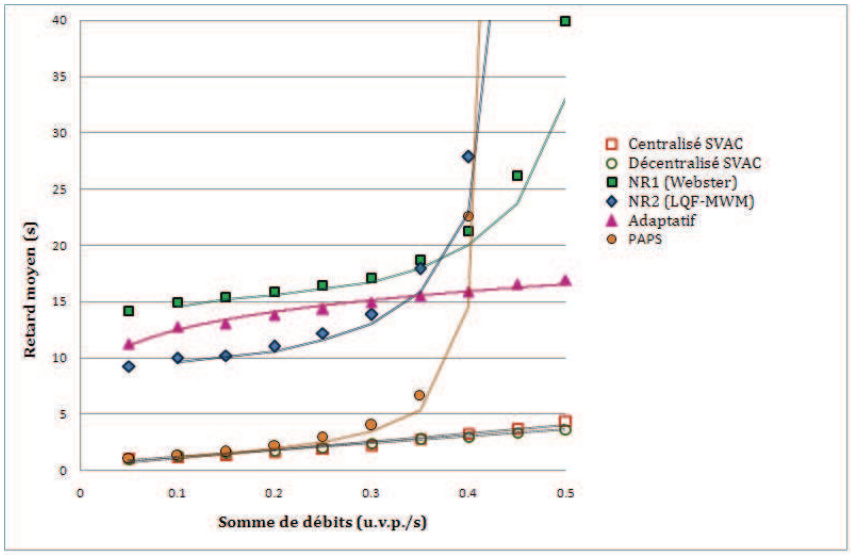


Figure 2- 29. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches

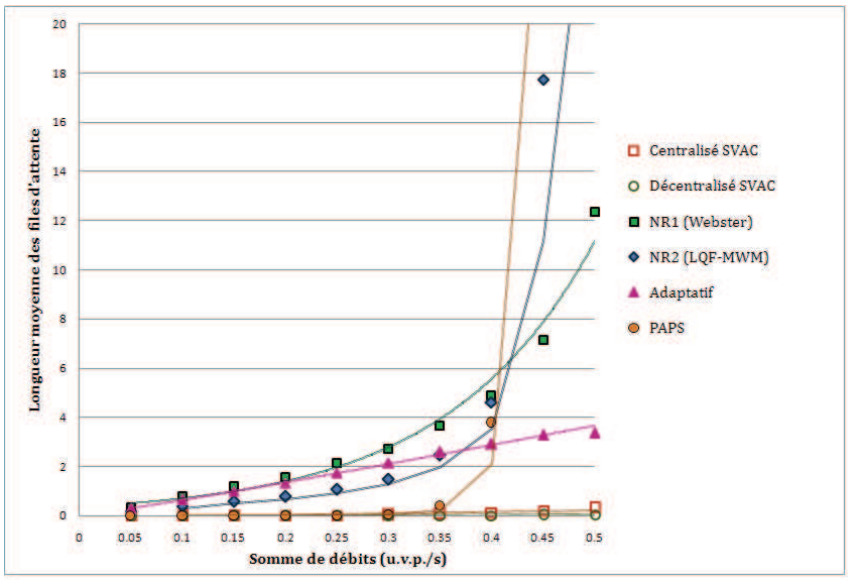


Figure 2- 30. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini une nouvelle boucle de régulation du trafic au niveau des intersections. Elle s'inspire du concept de l'intersection autonome. Cette boucle permet de personnaliser les consignes envoyées aux véhicules en fonction de leur état. Ainsi, nous avons nommé le système proposé : système du véhicule actionneur coopératif puisque chaque véhicule participe par sa présence à l'activation de son droit de passage. Le système s'appuie sur la communication sans-fil de voisinage et les technologies de positionnement. Deux approches se dégagent de la boucle de régulation proposée. La première est centralisée où un régulateur calcule les séquences optimales de sortie des véhicules. La deuxième est décentralisée où les véhicules participent au calcul de la séquence grâce aux capteurs frontaux de positionnement relatif. Dans tous les cas, l'activation des droits de passage dépend seulement de la situation présente observée. Pour le régulateur centralisé, nous avons abordé le problème de régulation dans l'objectif de vider l'intersection au plutôt. Pour le régulateur décentralisé, nous avons abordé la minimisation instantanée de la longueur des files d'attente.

Pour chaque approche nous avons proposé un algorithme correspondant. Ces algorithmes sont basés sur la modélisation du système de l'intersection à l'aide d'un réseau de Petri P-temporisé. Les approches ont été simulées. Les performances dégagées par ces deux approches démontrent leur avantage par rapport à la régulation du trafic adaptative et aux approches basées sur la communication sans-fil présentées dans la littérature. Lorsque le trafic est faible la boucle de régulation proposée permet des gains considérables en termes de retard moyen, de débit de sortie, de longueur moyenne des files d'attente et des temps d'évacuation. Lorsque le trafic est élevé, le choix des algorithmes adoptés s'avère très efficace à l'égard de ces quatre critères.

Cependant la contribution présentée dans ce chapitre se limite à une intersection élémentaire. Ces résultats encourageant militent pour l'extension des deux approches à des intersections plus complexes. Nous traiterons ce problème dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 . REGULATION COOPERATIVE D'UNE INTERSECTION PLUS COMPLEXE

Introduction

Les résultats intéressants obtenus à l'échelle d'une intersection élémentaire nous incitent à étendre les deux approches de régulations proposées aux intersections ordinaires. Dans le chapitre précédent, nous avons considéré la zone de conflit comme étant une ressource partagée entre les véhicules. Cette ressource est utilisée par au plus un corridor à la fois. Cependant dans le cas des intersections ordinaires, des véhicules venant de rues différentes peuvent traverser l'intersection simultanément sans conflit. C'est à dire que la ressource (la zone de conflit) peut être utilisée par plusieurs mouvements à la fois. Ainsi, il ne suffit pas seulement d'appliquer les deux régulateurs proposés précédemment à chaque paire de mouvements conflictuels. Il faut étudier analytiquement les régulateurs proposés à ce cas complexe. Enfin, il faut vérifier qu'ils permettent de dégager des performances similaires à celles que nous avons obtenues précédemment.

Rappelons que nous avons abordé deux scénarios de déploiement du SVAC. Le premier a abouti sur un régulateur centralisé qui attribue exclusivement à l'infrastructure le rôle de la distribution des droits d'accès. Dans le deuxième scénario, la distribution des droits d'accès est partagée entre l'infrastructure et les véhicules, donnant lieu à un régulateur décentralisé. L'un des problèmes majeurs auquel nous devons faire face dans le cas du régulateur centralisé est le temps et l'espace mémoire nécessaires pour les calculs. Dans le cas du régulateur SVAC décentralisé, nous nous heurtons à l'absence de modèle analytique du système d'une intersection ordinaire qui convient à l'approche que nous proposons.

Afin de pouvoir répondre aux interrogations relatives à l'extension des deux régulateurs, il faut définir les contours de ce que nous nommons intersection ordinaire. En effet, une intersection ordinaire peut revêtir plusieurs schémas liés à la géométrie et aux mouvements autorisés. Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux intersections à quatre branches avec des mouvements directs. Ces intersections soulèvent le problème des accès simultanés à la zone de conflit, ce qui nous permet d'aborder le problème de la complexité algorithmique que les régulateurs SVAC centralisés soulèvent. En outre, avec l'augmentation de la dimension de l'intersection, le nombre de véhicules à traiter accroît fortement, ce qui nous oblige d'envisager l'utilisation d'heuristiques pour le calcul des séquences. Ces intersections nous conduisent aussi à étendre le modèle RdP présenté dans le chapitre précédent afin de vérifier la possibilité d'utiliser les résultats du lemme 2-1 qui constitue la base du régulateur SVAC décentralisé.

Ce chapitre est organisé comme suit : En premier, il étend le modèle RdP afin de décrire les accès simultanés des véhicules à la zone de conflit dans une intersection à quatre branches. Ensuite, la deuxième section s'intéresse au problème de minimisation du temps pour vider l'intersection. Une approche exacte ainsi que deux heuristiques seront proposées. La troisième section donne la formulation des règles de distribution des droits de passage dans le cadre du régulateur SVAC décentralisé. Enfin, nous comparons les résultats des différentes approches de régulation proposées aux approches de la littérature.

3.1. Modélisation du système

Le modèle introduit dans le chapitre précédent a permis d'aborder le problème de régulation d'une intersection élémentaire. Dans cette partie, nous allons étendre ce modèle de telle sorte à ce qu'il puisse non seulement résoudre le problème de partage de ressources, mais aussi

permettre à plusieurs utilisateurs de partager parallèlement une ressource. Avant d'introduire le modèle, nous présentons en détail la configuration du système de l'intersection ordinaire à quatre branches ainsi que les hypothèses de base de son fonctionnement.

3.1.1. Configuration d'une intersection à quatre branches

Nous considérons une intersection de quatre rues à double sens où chaque sens de circulation se déplace sur une seule voie (Figure 3- 1). Chaque mouvement est partagé en trois zones : la zone de stockage, la zone de conflit, la zone de sortie. Les trois marqueurs de position sont mis à l'entrée de chaque zone. Dans ce système, les technologies de communication sans-fil et de positionnement sont requises pour assurer la sécurité et distribuer les droits d'accès aux véhicules. À la lumière des résultats du chapitre précédent, nous maintenons l'utilisation des capteurs frontaux pour les véhicules.

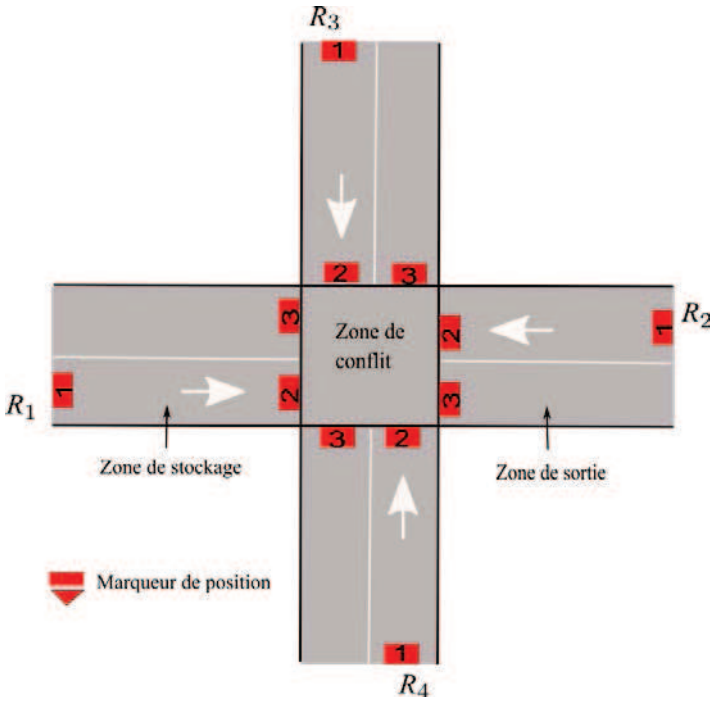


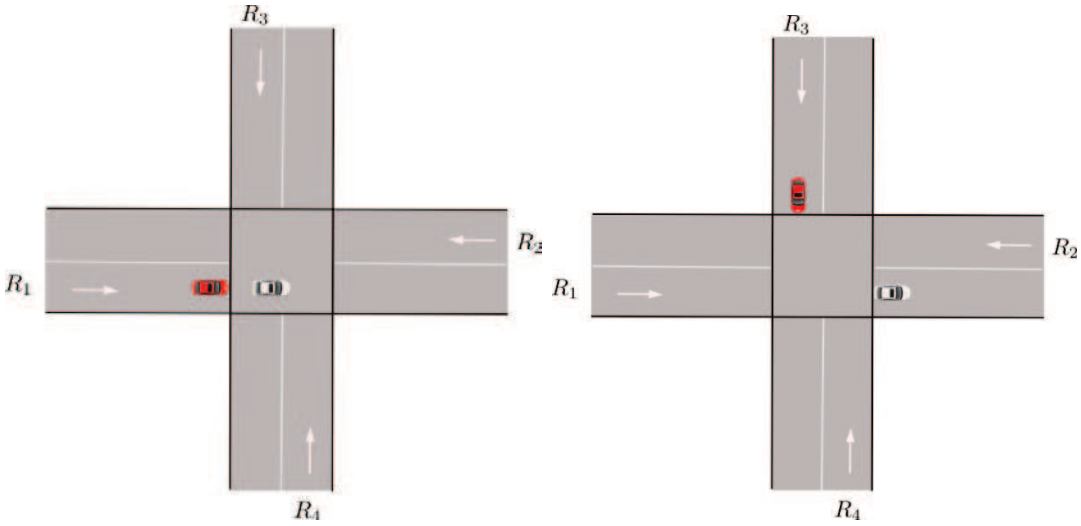
Figure 3- 1.Configuration d'une intersection à quatre branches

Sans perte de généralité, chaque rue permet aux véhicules d'aller tout droit. En effet, pour simplifier le système, nous ne considérons pas de mouvements de tourne-à-droite et de tourne-à-gauche. Ainsi, deux courants conflictuels sont définis, i.e. le courant des véhicules provenant des rues R_1 et R_2 et le courant des véhicules provenant des rues R_3 et R_4. Il faut noter que deux véhicules provenant de rues différentes mais sans conflit traversent l'intersection parallèlement. Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, nous nous intéressons aux événements discrets observés par les trois marqueurs de position. Les arrivées des véhicules au niveau du premier marqueur de position sont les données d'entrée du système. Pour déterminer la séquence de passage de véhicules, le système doit estimer les temps d'arrivée des véhicules par la formule (2.1). D'ailleurs, les accès à la zone de conflit doivent respecter les écarts de temps inter-véhiculaire de sécurité. Nous distinguons trois cas si deux véhicules traversent successivement la zone de conflit :

- Si deux véhicules proviennent de la même rue R_i (voir Figure 3- 2(a)), ils sont alors espacés d'au moins d_i secondes. La formule (2.2) nous donne la borne inférieure de cette valeur.

- Si deux véhicules proviennent des courants conflictuels, par exemple R_1 et R_3, ils sont alors espacés d'un temps L_i supérieur à d_i (voir Figure 3- 2(b)). L_i inclut les temps perdus à cause du démarrage et du dégagement du véhicule appartenant au mouvement opposé. Ce temps dépend de la vitesse moyenne des véhicules et de l'aménagement de l'intersection.

- Si deux véhicules proviennent de mouvements sans conflit, comme R_1 et R_2, ils sont alors admis sans aucune contrainte.



(a) d_i **(b) L_i**

Figure 3- 2. Contraintes temporelles

Les deux premiers cas rappellent les conditions introduites lors de la modélisation des intersections élémentaires simples. Le troisième cas permet à deux véhicules provenant de rues différentes mais sans conflit de traverser l'intersection en parallèle. En d'autres termes, la ressource est partagée par plusieurs utilisateurs. Le modèle présenté dans le chapitre précédent requiert une extension. Ceci nous conduit à définir un nouveau modèle générique.

3.1.2. Modèle RdP de l'intersection

Nous supposons que les quatre rues sont similaires, à savoir $d_i = d$ et $L_i = L$, pour $i \in [1,4]$. Le modèle RdP pour décrire les comportements des véhicules est montré dans la Figure 3- 3. Ce modèle est composé de trois parties : le sous-modèle R_1, R_2, le sous-modèle R_3, R_4 et le sous-modèle du régulateur. Les sous-modèles R_1, R_2 et R_3, R_4 décrivent respectivement les événements relatifs aux comportements des véhicules. La signification des transitions u_i, e_i, v_i, x_i est donnée dans le Tableau 2-1.

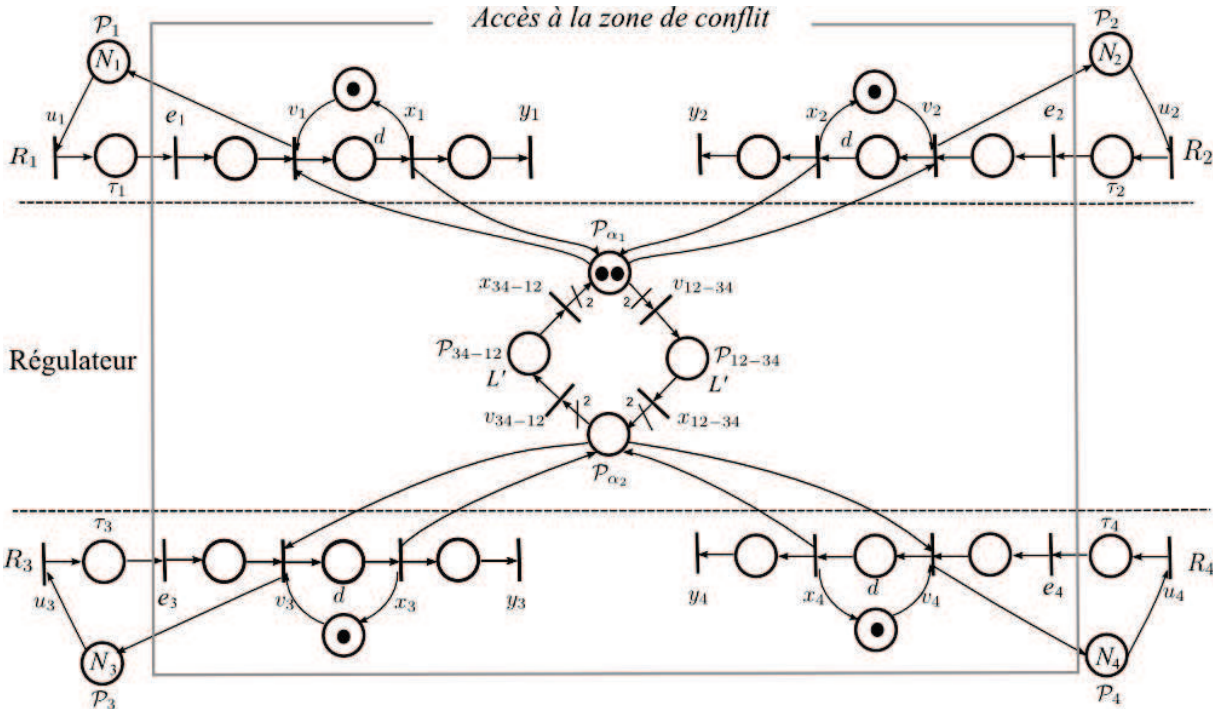


Figure 3- 3. Modèle RdP P-temporisé d'une intersection à quatre branches

Le sous-modèle central représente le comportement admissible de la distribution des droits d'accès. Ce modèle empêche deux véhicules appartenant à deux courants conflictuels de traverser la zone de conflit en même temps. Dans ce modèle, il y a aussi deux places temporisés ($\mathcal{P}_{12-34}$ et $\mathcal{P}_{34-12}$) et deux places immédiates ($\mathcal{P}_{\alpha_1}$ et $\mathcal{P}_{\alpha_2}$). Un jeton dans la place $\mathcal{P}_{12-34}$ indique que le droit de passage est attribué aux véhicules venant des rues R_3, R_4 après avoir été attribué aux véhicules provenant du courant conflictuel ; et inversement pour la place $\mathcal{P}_{34-12}$. Les temporisations L' de ces places tiennent compte du temps sécurité (temps de dégagement), où L'=L-d. Il faut noter qu'il y a deux jetons dans la place $\mathcal{P}_{\alpha_i}, i = \{1,2\}$, qui permettent aux véhicules venant du même courant de traverser la zone de conflit parallèlement.

Nous remarquons qu'il y a deux conflits, le premier est entre v_1, v_2 et $v_{12\text{-}34}$ et le second est entre v_3, v_4 et $v_{34\text{-}12}$. Le problème de contrôle consiste à déterminer la séquence de tir de ces transitions, en fonction des séquences de tir des transitions $e_i (i \in [1,4])$. Nous avons alors les inégalités suivantes :

$$\begin{cases} v_1(t) + v_2(t) \leq 2 + v_1(t-d) + v_2(t-d) + 2 \times v_{34-12}(t-L') - 2 \times v_{12-34}(t) \\ v_3(t) + v_4(t) \leq v_3(t-d) + v_4(t-d) + 2 \times v_{12-34}(t-L') - 2 \times v_{34-12}(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Sous contraintes

$$\begin{cases} 0 \leq v_{12-34}(t) - v_{34-12}(t-L') \leq 1 \\ v_i(t) \leq e_i(t) \ \ avec \ \ i \in [1,4] \end{cases}$$

Pour assurer la fluidité de la circulation, nous avons choisi deux stratégies différentes qui dépendent de l'implication de l'infrastructure:

- Dans le cas de régulateur SVAC centralisé, le problème de régulation du trafic consiste à vider l'intersection au plus tôt pour chaque instant t:

$$\begin{cases} trouver \min\limits_{\sum_{i=1}^{4} q_i(\hat{t})=0} \hat{t} \\ sachant\ e_i(0), \dots, e_i(t), i \in [1,4] \\ sous\ les\ contraines\ (3.1) \end{cases} \quad (3.2)$$

Où $q_i(t)$ est la longueur de la file d'attente dans la rue R_i à l'instant t, $q_i(t) = e_i(t) - v_i(t)$.

- Pour le régulateur SVAC décentralisé, la stratégie consiste à continuellement réduire la longueur de la file d'attente $\sum_{i=1}^{4} q_i(t)$. Ce régulateur ci est entièrement basée sur l'analyse du model RdP.

Nous allons examiner séparément chaque approche dans les parties suivante.

3.2. Régulateur SVAC centralisé

Comme dans le chapitre précédent, à chaque étape le régulateur doit résoudre l'un des deux conflits, selon l'origine du dernier véhicule ayant traversé l'intersection. L'algorithme proposé précédemment reste ainsi valide. Cependant, il faut noter qu'avec l'augmentation de la dimension du problème, l'algorithme peut s'avérer inapproprié à cause du temps de calcul. Pour cela, nous proposons deux méthodes approchées. Dans cette partie, nous rappelons d'abord brièvement la méthode de programmation dynamique ainsi que sa complexité algorithmique pour résoudre le problème traité. Le but de ce rappel est de permettre la comparaison avec les méthodes approchées dans la suite.

3.2.1. Méthode de la programmation dynamique

Algorithme de régulation

Soit $u_i(t) = n_i$ qui correspond au nombre de véhicules présents dans la rue R_i. Notons le problème (3.2) par $[n_1,n_2,n_3,n_4]$. Si $n_i>0$, le problème peut être décomposé en quatre sous problèmes $[n_1,n_2,n_3,n_4,i]$, où $[n_1,n_2,n_3,n_4,i]$ signifie que le dernier véhicule qui a été autorisé à traverser l'intersection appartient à la rue R_i. Chaque sous-problème peut être décomposé, à son tour, en quatre sous-problèmes en supprimant le dernier véhicule autorisé de la séquence originale. En générale, un problème $[q_1,q_2,q_3,q_4,i]$ avec $(0 \le q_i \le n_i)$ engendre au maximum quatre sous-problèmes $[m_1,m_2,m_3,m_4,i]$, avec :

$$(m_1,m_2,m_3,m_4) = \begin{cases} (q_1-1,q_2,q_3,q_4) & si \quad i=1 \quad \wedge \quad q_1 \ge 1 \\ (q_1,q_2-1,q_3,q_4) & si \quad i=2 \quad \wedge \quad q_2 \ge 1 \\ (q_1,q_2,q_3-1,q_4) & si \quad i=3 \quad \wedge \quad q_3 \ge 1 \\ (q_1,q_2,q_3,q_4-1) & si \quad i=4 \quad \wedge \quad q_4 \ge 1 \end{cases} \quad (3.3)$$

Cette décomposition du problème engendre au plus quatre sous-problèmes en supprimant le dernier véhicule. La décomposition continue jusqu'à ce qu'il ne reste plus de véhicules, afin d'aboutir au problème [0,0,0,0][22]. Le processus de décomposition construit aussi un graphe orienté $= (S, A)$, où S est l'ensemble des sommets et A l'ensemble des arcs orientés. A chaque sommet $s \in S$ correspond un sous-problème et chaque arc orienté lie le sous-problème enfant au sous-problème parent. Chaque arc orienté suppose une décision prise pour résoudre l'un des

[22] Si la zone de conflit est vide à l'état initial

deux conflits cités précédemment. Ainsi, nous associons aux arcs les poids relatifs aux durées de disponibilité du jeton de la manière suivante :

$$w(a) = \begin{cases} d & si \quad a \quad lie \quad [m_1, m_2, m_3, m_4, i] \quad \text{à} \quad [q_1, q_2, q_3, q_4, j] \quad , j = i \\ L & si \quad a \quad lie \quad [m_1, m_2, m_3, m_4, i] \quad \text{à} \quad [q_1, q_2, q_3, q_4, j] \quad , j \hat{\neq} i \\ 0 & sinon \end{cases} \tag{3. 4}$$

Où $j \hat{\neq} i$ désigne R_i et R_j deux rues qui génèrent deux mouvements en conflit. À titre d'exemples, $1 \hat{\neq} 3$ et $2 \hat{\neq} 4$ selon les rues montrées dans la Figure 3- 1.

A chaque nœud $[q_1, q_2, q_3, q_4, i]$ nous associons $r_{(i,q_i)}$ qui désigne une borne inférieure de la date de disponibilité du dernier véhicule admis. Le plus court chemin entre le nœud [0,0,0,0] et le nœud [n_1,n_2,n_3,n_4] nous donne la séquence de passage qui permet de vider l'intersection au plus tôt. En suivant le même raisonnement que celui présenté dans le chapitre précédent, la complexité en temps de l'algorithme pour trouver le plus court chemin de [0,0,0,0] au [n_1,n_2,n_3,n_4] vaut $\Theta(16n^4)$. La complexité en espace vaut $\Theta(4n^4)$ [Wu, Abbas-Turki et al. 2009b].

Exemple du fonctionnement de l'algorithme de la programmation dynamique

Nous prenons un exemple simple avec neuf véhicules. Nous supposons une flotte homogène de véhicules en utilisant les paramètres présentés dans le Tableau 2-3. A l'exception de la longueur de la zone de stockage qui est de 150 *m*, les caractéristiques de l'infrastructure restent aussi les mêmes. Les dates d'arrivée de ces véhicules, ainsi que les contraintes temporelles utilisées sont présentées dans le Tableau 3- 1.

Tableau 3- 1. Données du problème

Rues	$r_{(i,q_i)}$			τ_i	d_i	L_i
R_1	$r_{(1,1)}$=0 *s*	$r_{(1,2)}$=3 *s*	$r_{(1,3)}$=8 *s*	10 *s*	2 *s*	6 *s*
R_2	$r_{(2,1)}$=1 *s*	$r_{(2,2)}$=5 *s*	$r_{(2,3)}$=10 *s*			
R_3	$r_{(3,1)}$=4 *s*	$r_{(3,2)}$=7 *s*				
R_4	$r_{(4,1)}$=6 *s*					

L'algorithme doit résoudre le problème [3,3,2,1]. Un graphe orienté $G = (S, A)$ du problème [3,3,2,1] est construit dans la Figure 3- 4. Ici, nous ne détaillons pas tous les nœuds car le nombre de nœud vaut 258. L'objectif est de donner un aperçu de la structure de cette décomposition. Par exemple, le nœud [3,3,2,1,2] est décomposé en quatre sous-problèmes, la flèche avec le chiffre 10 indique le temps d'arrivée du véhicule (2,3). Le chiffre en dessous de ce nœud signifie qu'il faudra au minimum 17 s pour faire sortir tous les véhicules si le véhicule (2,3) sort en dernier. Le chemin en rouge donne le chemin le plus court qui coûte 17 *s*. Ce chemin correspond à une séquence optimale de passage des véhicules. Les nœuds situés dans ce chemin nous donne les temps d'accès des véhicules, tels que montrés dans la Figure 3- 5. Nous remarquons que tous les véhicules respectent les contraintes temporelles, à savoir deux véhicules sont espacés soit par 2 *s* soit par 6 *s*.

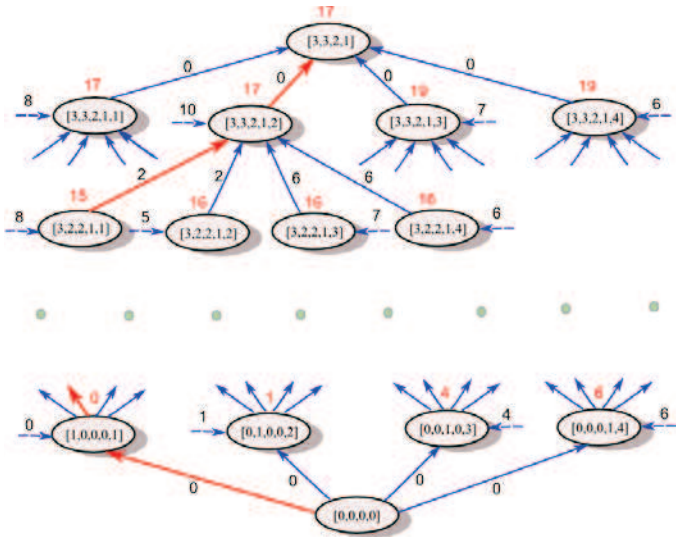


Figure 3- 4. Représentation graphique de la résolution du problème [3,3,2,1]

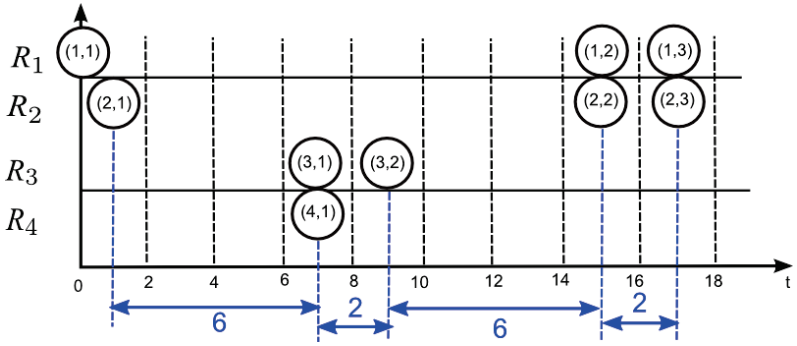


Figure 3- 5. Une séquence de passage optimale trouvée par la programmation dynamique

L'algorithme de programmation dynamique nous offre une solution optimale du problème (3.2). Cependant, il sera gourmand en espace mémoire lorsque le nombre des véhicules est très important. Par exemple, si le problème doit traiter 200 véhicules, il faut environ 300 secondes pour trouver une solution optimale. Le problème du temps de calcul est crucial, lorsque nous voulons généraliser l'algorithme à des intersections ordinaires, avec un nombre de mouvements relativement élevé. Il est ainsi plus judicieux de faire appel à des méthodes approchées.

3.2.2. Heuristiques

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement une solution réalisable, qui n'est pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation NP-difficile [Dean 1995; K.Burke et Kendall 2005; Thomas, Charles et al. 2009]. Généralement une heuristique est conçue pour un problème particulier, en s'appuyant sur sa structure propre.

Algorithme de régulation

Si nous considérons des véhicules qui traversent la zone de conflit sans interruption, comme un ***peloton*** de véhicules, l'ordre de passage de véhicules peut être exprimé par une séquence de pelotons (SP):

$$SP = \left(P_1, P_2, \cdots, P_{n_P},\right) \tag{3.5}$$

Où P_k désigne le $k^{ème}$ peloton dans la séquence de passage SP avec $1 \leq k \leq n_P$; et n_P désigne le nombre de pelotons. Naturellement, $2 \leq n_P \leq \sum_{i=1}^{4} n_i$, où n_i indique le nombre de véhicules de la rue R_i .

Dans chaque peloton, les véhicules appartiennent aux courants sans conflit. Nous pouvons observer quelques propriétés de *SP* :

- Soit d' l'écart de temps réel entre deux véhicules successifs de la même rue. Si $d' - d > 0$ (d est l'écart de temps minimal de sécurité entre deux véhicules successifs), alors pendant $d' - d$ aucun véhicule de cette rue ne traverse la zone de conflit. La ressource (la zone de conflit) est à l'état de repos. On appelle cette période comme l'***écart de temps excédentaire*** ou le ***temps libre d'un peloton***;

- D'après la définition du peloton, deux pelotons successifs appartenant à deux mouvements conflictuels sont séparés par l'écart de temps de sécurité *L*. Le nombre d'écart de temps inter-véhiculaire de sécurité *L* égale au nombre de pelotons moins un.

A l'aide de l'expression de *SP* (3.5), nous pouvons déduire que pour minimiser le temps d'évacuation, il faut réduire à la fois le nombre de pelotons et le temps libre de chaque peloton. Cela nous conduit au dilemme suivant. D'une part, pour réduire le nombre de pelotons, il faut qu'on regroupe le plus de véhicules possibles. En conséquence, la somme du temps libre de peloton peut augmenter si l'écart de temps réel inter-véhiculaire est important. D'autre part, pour diminuer le temps libre de chaque peloton, on regroupe les véhicules dont l'écart de temps inter-véhiculaire de sécurité est égal à *d*, ce qui entraîne l'augmentation du nombre de pelotons.

Pour résoudre ce dilemme, nous avons fait appel à l'analogie avec l'escalade d'une colline [Burke et Kendall 2005]. L'algorithme de l'escalade d'une colline fonctionne comme suit : il passe d'une solution vers une autre meilleure et s'arrête lorsqu'il n'y a plus d'amélioration possible. L'heuristique est décrite ci-dessous (voir Algorithme 3- 1). D'abord, l'étape 1 donne une solution initiale avec un temps libre minimal dans chaque peloton. Ensuite, les étapes de 2 à 8 tentent d'améliorer localement la solution obtenue. Elles ajoutent progressivement les véhicules suiveurs au peloton sélectionné afin de diminuer le nombre de pelotons. L'algorithme s'arrête lorsque la solution ne peut plus être optimisée.

Pour mettre en œuvre cet algorithme, la définition de ***peloton compact*** doit être introduite. Un peloton compact (*PC*) est un peloton dans lequel l'écart de temps inter-véhiculaire réel *d'* est exactement égale à *d*. Pour un peloton compact, la somme de temps libre vaut 0.

Le théorème suivant nous donne la complexité algorithmique.

Théorème 3-1. La complexité en temps de l'heuristique vaut $\Theta(n^2)$.

Preuve: D'une part, dans l'étape 1, chaque véhicule sera examiné pour composer les premiers pelotons compacts. Cette étape est de l'ordre $\Theta(n)$. D'autre part, pour chaque peloton compact, une nouvelle séquence est construite, après incorporation du véhicule le plus proche. Par conséquent, la complexité vaut $\Theta(n^2)$ puisque dans le pire des cas il y a *n* pelotons compacts.

■

Algorithme 3- 1. Heuristique

1. Construire une séquence initiale $SP = (P_1, P_2, \cdots, P_{n_P},)$, où chaque peloton est un ***peloton compact***. Le temps d'évacuation de *SP* est noté *MaxE*;
2. $\mathbb{K} = \{1,2, \cdots, n_P\}$
3. Evaluer la somme du temps libre TL_i de chaque peloton P_i, $1 \leq i \leq n_P$ en supposant que le véhicule le plus proche de P_i est incorporé ;
4. Sélectionner le peloton P_k avec le temps libre minimal, où $k \in \mathbb{K}$ avec $TL_k = \min_{i \in \mathbb{K}}\{TL_i\}$, incorporer le véhicule comme dans l'étape 3 et former un nouveau P'_k;
5. Pour les véhicules appartenant aux pelotons $P_j\,(k+1 \leq j \leq n_P)$, recalculer une nouvelle séquence de passage $(P'_{k+1}, P'_{k+2}, \cdots, P'_{n_P})$ en formant des pelotons compacts;
6. Combiner les sous-séquences $(P_1, P_2, \cdots P_{k-1}, P'_k)$ et $(P'_{k+1}, P'_{k+2}, \cdots, P'_{n_{P'}})$ et obtenir une nouvelle séquence $SP' = (P_1, P_2, \cdots P_{k-1}, P'_k, P'_{k+1}, P'_{k+2}, \cdots, P'_{n_{P'}})$. Le temps d'évacuation de *SP'* est noté *MaxE'*;
7. Si $MaxE' \leq MaxE$,
   $SP = SP', MaxE = MaxE'$ *et* $n_P = n_{P'}$, aller à l'étape 2;
   Sinon aller à l'étape 8;
8. Si $\mathbb{K} \neq \Phi$, $\mathbb{K} = \mathbb{K} - \{k\}$, aller à l'étape 4; sinon retourner les résultats *SP* et *MaxE*

Exemple du fonctionnement de l'heuristique proposée

Pour illustrer le fonctionnement de cette heuristique, nous l'appliquons à l'exemple introduit dans le Tableau 3- 1.

Au début, une séquence initiale composée des pelotons compacts est trouvée avec *MaxE* = 26s (Figure 3- 6). Ensuite viens le choix d'ajout d'un nouveau véhicule à l'un des pelotons compacts. Les valeurs de temps libre engendrées par cet ajout sont données dans la Figure 3- 6 en dessous de chaque peloton. Il faut donc ajouter un véhicule au peloton P_1 et ensuite recomposer de nouveaux pelotons.

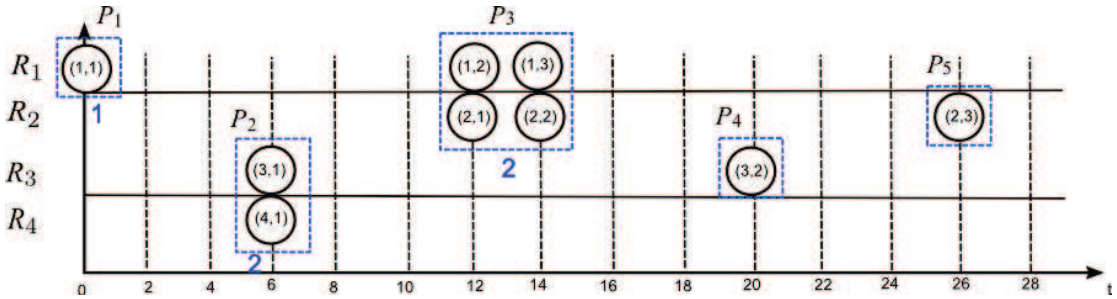


Figure 3- 6. Séquence initiale composée des pelotons compacts

Le résultat est donné dans la Figure 3- 7. Cette nouvelle séquence permet de vider l'intersection plus rapidement. Nous procédons de même pour calculer la nouvelle séquence. Comme le premier et le deuxième peloton ont les mêmes valeurs, nous traitons le peloton avec le plus petit indice d'abord, i.e. le premier. Ensuite, une nouvelle séquence est construite (voir la Figure 3- 8).

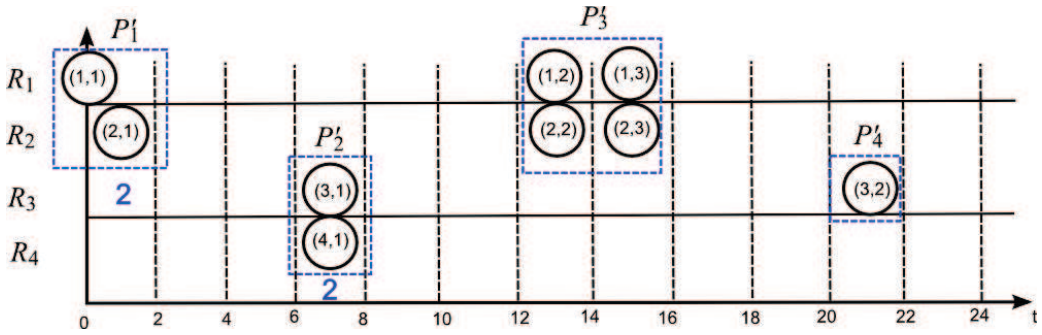


Figure 3- 7. Nouvelle séquence après avoir renouvelé P_1

Nous constatons que le choix d'ajouter un nouveau véhicule au peloton P_1 détériore la solution initiale. Ainsi, nous explorons le peloton P_2. Ceci donne la solution présentée dans la Figure 3- 9.

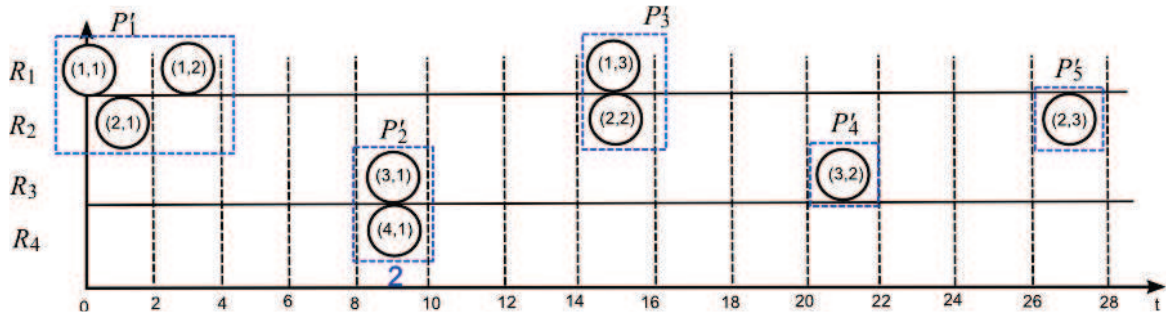


Figure 3- 8. Séquence obtenue après avoir renouvelé P_1

Nous remarquons que le temps d'évacuation s'est amélioré. L'heuristique s'arrête car le prochain ajout de véhicules à P_1 détériore la solution.

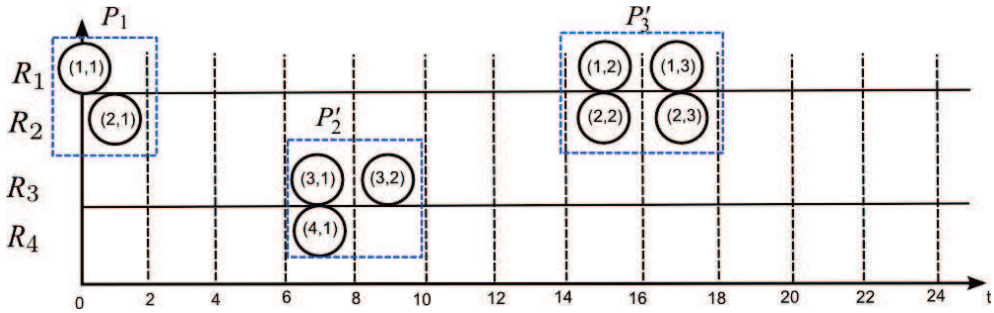


Figure 3- 9. Séquence obtenue après avoir renouvelé P_2

Il faut noter que l'heuristique introduite ici a trouvé la solution optimale pour cet exemple. L'heuristique proposée semble efficace. Toutefois, il s'agit d'un calcul approché qui permet de trouver un optimum local. Ceci nous pousse à considérer d'autres méthodes, à savoir les méta-heuristiques.

3.2.3. Méthode de colonies de fourmis

Dans cette partie, nous faisons appel aux colonies de fourmis car il s'agit d'une méta-heuristique adaptée à la résolution du problème du voyageur de commerce (en anglaise, TSP : Travelling Salesman Problem)[A. Wolsey et L. Nemhause 1999; Arora et Barak 2009]. En effet, le problème (3.2) est analogue au TSP, en considérant chaque véhicule comme étant une ville à visiter. Les contraintes de temps entre le passage de deux véhicules s'apprêtent à l'analogie avec les temps de trajet d'une ville à une autre [Wu, Abbas-Turki et al. 2011]. Par conséquent, le plus court chemin qui passe exactement une fois par chaque ville correspond à la séquence de passage de

véhicules avec le temps de sortie minimal. Etant posé ainsi, le problème traité est un TSP qui pourrait être résolu efficacement par l'algorithme de colonie de fourmis [Dorigo et Gambardella 1997; Dorigo et Blum 2005].

Les algorithmes de colonies de fourmis sont des algorithmes inspirés du comportement des fourmis et constituent une famille de méta-heuristiques d'optimisation [Stutzle et Dorigo 2002; Dorigo et Stutzle 2004; Dorigo, Birattari et al. 2006]. L'idée originale provient de l'observation de l'exploitation des ressources alimentaires chez les fourmis. Les fourmis échangent indirectement de l'information en déposant des phéromones et en suivant le chemin avec plus de phéromone. Le plus court chemin sera donc de plus en plus attractif.

Représentation graphique du problème

Avant d'introduire l'algorithme, une représentation graphique de ce problème est nécessaire. Soit $\bar{G} = (\bar{V}, \bar{A}, \bar{w})$ un graphe complet orienté avec $\bar{V}$ un ensemble de villes (nœuds), $\bar{A}$ un ensemble d'arcs et $\bar{w}$ une fonction de coût sur les arcs (Voir Figure 3- 10).

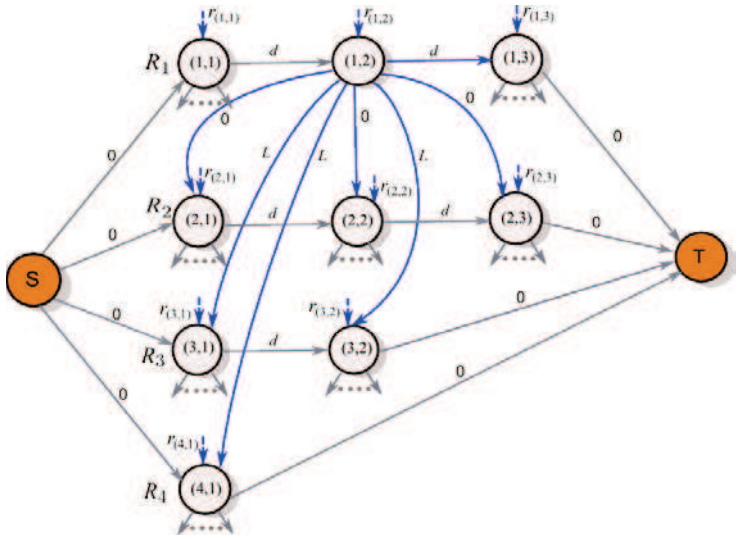


Figure 3- 10. Schéma d'un graphe $\bar{G} = (\bar{V}, \bar{A}, \bar{w})$ (arcs du nœud (1,2) sont détaillés)

Un nœud (i, q_i) désigne le $q_i$ème véhicule dans la rue R_i, où $1 \leq q_i \leq n_i$ et n_i le nombre de véhicules présents dans la rue R_i. $\bar{V}$ contient tous les nœuds (i, q_i) et deux nœuds virtuels : un nœud source S et un nœud terminus T. Le nœud source S indique le début d'une séquence et le nœud terminus T désigne la fin d'une séquence. Il faut noter qu'un nœud virtuel ne représente aucun véhicule. Les nœuds (i, q_i) sont disposés dans l'ordre croissant des temps d'arrivée des véhicules.

Le coût d'un arc (v_i, v_j) est définit comme suit $(v_i, v_j \in \bar{V})$:

$$w(v_i, v_j) = \begin{cases} d, & si \quad v_i = (i, q_i) \; et \; v_j = (i, q_i + 1) \\ s, & si \quad v_i = (i, q_i), v_j = (j, q_j) \; et \; i \hat{\neq} j \\ 0, & sinon \end{cases} \qquad (3.6)$$

Où $i \hat{\neq} j$ désigne deux rues R_i et R_j qui génèrent deux mouvements en conflit.

La Figure 3- 10 présente tous les arcs du nœud (1,2) dans le graphe $\bar{G}$. Le poids de l'arc qui lie les nœuds (1,2) et (1,3) vaut d car les véhicules (1,2) et (1,3) qui sont dans la même rue doivent

respecter le contrainte temporelle d ; alors que ceux entre (1,2) et tous les nœuds situés dans la ligne R_2 égalent 0 car aucune contrainte temporelle n'est exigée pour deux véhicules provenant de mouvements différents sans conflit. Pour l'arc qui connecte les nœuds (1,2) et (3,1), (3,2) et (4,1), leur poids vaut L puisque le mouvement du véhicule (1,2) est en conflit avec ceux des véhicules provenant des rues R_3 et R_4. Il faut noter que pour les autres nœuds, ils ont des relations de précédence (arcs) similaires au nœud(1,2). En conséquence, tous les arcs dans le graph (Figure 3- 10) ne sont pas présentés pour des soucis de clarté.

Une solution faisable du problème (3.2) est un chemin $C(S,T)$ du nœud source S au nœud T, qui visite tous les nœuds du graphe $\bar{G}$ une fois, en respectant des contraintes définies par les arcs. Alors, la longueur du sous-chemin du nœud S au nœud (i,q_i) (désignée par $L_{(i,q_i)}$) désigne le calcul du temps d'évacuation du véhicule (i,q_i). Cependant, $L_{(i,q_i)} \geq r_{(i,q_i)}$ car ce calcul doit prendre aussi en considération les dates $r_{(i,q_i)}$ auxquelles les véhicules sont théoriquement prêts pour traverser l'intersection. $r_{(i,q_i)}$ est représenté en haut de chaque nœud (voir les flèches bleues dans la Figure 3- 10) afin de définir une borne inférieure à la longueur de chaque sous-chemin comme décrit dans la suite.

La longueur du chemin $C(S,T)$ désignée par L_T est la formule récurrente suivante qui commence au nœud S et se termine au nœud T:

$$L_{v_j} = \max\left\{L_{v_i} + w(v_i, v_j), r_{v_j}\right\} \qquad (3.7)$$

Où $w(v_i, v_j)$ est le poids de l'arc (v_i, v_j) et r_{v_j} le temps de disponibilité du véhicule désigné par le nœud v_j , $L_S = 0$.

Un chemin $C^*(S,T)$ est une solution optimale du (3.2) si et seulement si pour tous les chemins $C(S,T)$, nous avons $L_T^* \leq L_T$, où L_T^* la longueur du chemin $C^*(S,T)$.

Construction de solution

L'algorithme 3-2 est appliqué afin de trouver le plus court chemin $C^*(S,T)$. Le principe de l'algorithme fonctionne comme suit :

m fourmis sont placés sur le nœud S et choisissent aléatoirement les nœuds suivants (limités aux premiers nœuds de chaque rue). Chaque fourmi construit un chemin $C(S,T)$ (une solution réalisable) par une ***règle de déplacement***. En construisant le chemin, chaque fourmi modifie également la quantité de phéromones sur les arcs visités par l'application d'une ***règle locale de renouvellement***. Une fois que toutes les fourmis aient fini leurs tournées, la quantité de phéromones sur le chemin le plus court est modifiée par une ***règle globale de renouvellement***.

D'après la description de cet algorithme, l'initialisation de la quantités de phéromone τ_0, la règle de déplacement, et les règles de renouvellement des phéromones doivent être spécifiés.

Algorithme 3- 2. Algorithme du système de colonies de fourmis

1. Initialiser les quantités de phéromone τ_0 de chaque arc
2. Poser les fourmis sur le nœud *S* et les laisser choisir aléatoirement les nœuds suivants
3. Pour *i* de 1 à *C*

   \\ *C indique le nombre d'itérations*

   { Pour *j* de 1 à *m*

   { Fourmi *j* applique une règle de déplacement pour créer une solution ;

   Les phéromones sur ce chemin sont renouvelées par une règle locale ;

   }

   Une règle globale est appliquée pour renouveler les phéromones ;

   }

Initialisation des quantités de phéromone

Nous utilisons la méthode présentée dans [Dorigo et Gambardella 1997] pour initialiser la quantité de phéromone :

$$\tau_0 = (n \cdot L_0)^{-1} \tag{3. 8}$$

Où n le nombre des nœuds (i, q_i) et L_0 le temps d'évacuation de la séquence trouvé par la construction de pelotons compacts introduite dans la partie 3.2.2.

Règle de déplacement

La règle de déplacement est appelée règle aléatoire de transition proportionnelle. Une fourmi k positionnée sur un nœud u passe sur le nœud v en appliquant la règle suivante:

$$v = \begin{cases} arg \max\limits_{i \in J_k(u)} \{\tau(u,i) \cdot \eta(u,i)^{\beta}\} & , si\ q \leq q_0 (exploitation) \\ V & , sinon \end{cases} \tag{3. 9}$$

Où $\tau(u,i)$ est la quantité de phéromone sur l'arc qui lie les nœuds u et i, $\eta(u,i)$ l'information heuristique; β (avec $\beta > 0$) la valeur du paramètre désignant l'importance de l'information heuristique, $J_k(u)$ l'ensemble des nœuds qui restent à visiter par la fourmi k positionné sur le nœud u, q_0 détermine l'importance relative de l'exploitation par rapport à l'exploration et enfin q un nombre aléatoire qui est distribué uniformément dans $[0,1]$.

Si q est inférieur à q_0 ($0 \leq q_0 \leq 1$), la fourmi choisit le nœud prochain avec la valeur maximale de $\tau(u,i) \cdot \eta(u,i)^{\beta}$, cela est appelé l'exploitation ; sinon, le nœud à déterminer est une variable aléatoire V qui est définit comme suit :

$$p_k(u,v) = \begin{cases} \dfrac{\tau(u,v) \cdot \eta(u,v)^{\beta}}{\sum_{i \in J_k(u)} \tau(u,i) \cdot \eta(u,i)^{\beta}} & , si\ v \in J_k(u) \\ 0 & , sinon \end{cases} \tag{3. 10}$$

Cette équation donne la probabilité avec laquelle la fourmi k située au nœud u décide de se déplacer vers un nœud v.

L'importance de l'information heuristique $\eta(u,v)$ représente l'influence de la longueur du chemin après l'insertion du nœud v. Notons la longueur du chemin de S à v par L_v. Nous définissons l'information heuristique $\eta(u,v)$ comme l'inverse de l'augmentation de la longueur après l'ajout de v plus 1 :

$$\eta(u,v) = (L_v - L_u + 1)^{-1} \tag{3.11}$$

Où L_u est la longueur du chemin du nœud S à u. L'ajout de 1 permet d'empêcher au dénominateur d'être égal à 0 si $L_v = L_u$.

On marque que la règle de déplacement favorise les nœuds qui ont la tendance de construire le plus court chemin et avec la grande quantité de phéromones.

Règles locale et globale de renouvellement des phéromones

En construisant une solution, les fourmis changent les quantités de phéromones des arcs visités par la règle locale de renouvellement :

$$\tau(u,v) = (1-\rho)\cdot\tau(u,v) + \rho\cdot\tau_0 \tag{3.12}$$

Où τ_0 désigne la quantité phéromone initiale; ρ indique la vitesse d'évaporation des phéromones ($0 < \rho < 1$).

Il faut noter que l'algorithme converge plus vite pour des valeurs de ρ plus faibles. Le contraire est aussi vrai, à savoir que pour de grandes valeurs de ρ, la diversité de la solution augmente. L'objectif d'introduire la règle locale de renouvellement ici consiste à augmenter la diversification de la recherche. Si une fourmi est passée sur un arc, cet arc devient un peu moins désirable pour les fourmis suivantes. De cette manière, les fourmis ne construisent pas les chemins dans un voisinage étroit du meilleur chemin précédent.

A la fin de l'itération, toutes les fourmis ont terminé leurs tours et une règle globale pour renouveler la quantité de phéromones est appliquée. Cependant, seule la fourmi qui a trouvé le meilleur chemin (le plus court) est autorisée à déposer les phéromones. Cela tend à conduire les fourmis au voisinage du meilleur chemin et engendre une grande vitesse de convergence de l'algorithme. La règle globale est donnée comme suit :

$$\tau(u,v) = (1-\alpha)\cdot\tau(u,v) + \alpha\cdot\Delta\tau(u,v) \tag{3.13}$$

Où

$$\Delta\tau(u,v) = \begin{cases} \left(\overline{L_T^*}\right)^{-1} & , si\ (u,v) \in le\ meilleur\ chemin \\ 0 & , sinon \end{cases}$$

α (avec $0 < \alpha < 1$) est la vitesse d'évaporation des phéromones et $\overline{L_T^*}$ est la longueur du meilleur chemin pour l'itération courante.

Théorème 3-2 La complexité en temps de Algorithme 3- 2 vaut $\Theta(4Cmn)$, où C indique le nombre d'itérations.

Preuve : Dans une itération, chaque fourmi a visité *n* nœuds. Chaque fois une fourmi décide de se déplacer à un nœud suivant, il y a au plus quatre possibilités. Comme il a *m* fourmis, après une itération, la complexité en temps vaut alors $\Theta(4mn)$. Or, l'algorithme se répète *C* fois, d'où le résultat.

■

Analyse des paramètres

D'après des définitions des formules (3.8~3.13), nous notons que les paramètres $\alpha, \beta, \rho, q_0, m, C$ jouent un grand rôle pour déterminer la qualité d'une solution. Nous devons effectuer une série d'expériences pour déterminer les valeurs de ces paramètres. Dans la suite, nous considérons l'influence de chaque paramètre à travers de la qualité de la solution obtenue. Nous adoptons la mesure du pourcentage de l'écart relatif à la solution optimal (***PER***) qui est défini comme suite :

$$PER = \frac{s - s^*}{s^*} \times 100\% \qquad (3.14)$$

Où s est la solution obtenue par l'algorithme de colonies de fourmis et s^* la solution optimale trouvée par la programmation dynamique.

Toutes les expériences sont mises en œuvre par le logiciel Matlab sur un PC Pentium IV 2.40 GHz. Le Tableau 3- 2 résume les scénarii expérimentaux du test. Le nombre total de véhicules pour chaque test alors vaut $= \lambda \times T \times C$. Supposons que les arrivées des véhicules obéissent à la distribution de Poisson qui représente un système réel de la circulation avec une précision suffisante [ADAMS 1936; Webster 1958a; May 1990; Mannering, Kilareski et al. 2004]. Nous divisons les deux premiers facteurs en trois niveaux: **B** (Bas), **M** (Milieu) et **H** (Haut). ***d*** est fixé à deux secondes en supposant que le débit maximal du trafic est inférieure à 0,5 *u.v.p./s.* ***L*** est choisi arbitrairement dans l'intervalle [3, 10].

Tableau 3- 2. Facteurs expérimentaux

Facteurs expérimentaux	Valeurs	Niveau
Taux d'arrivée $\boldsymbol{\lambda}$ pour courants sans conflit	U[23][0, 0.15]	B
	U[0.15, 0.3]	M
	U[0.3, 0.5]	H
Durée de Simulation $\boldsymbol{T}$	50s	B
	100s	M
	150s	H
Nombre des courants conflictuels $\boldsymbol{C}$	2	B
	3	M
	4	H
$\boldsymbol{d}$	2	
$\boldsymbol{L}$	U[3,10]	

Dans les expérimentations suivantes, trois cas de test sont choisis respectivement en fonction des trois scénarii: Cas B, Cas M et Cas H. Dix calculs indépendants sont effectués. Nous représentons la moyenne pour chaque cas. Les paramètres sont fixés initialement comme suit :

$$\alpha = 0{,}1 \quad \beta = 2 \quad \rho = 0{,}1 \quad m = 10$$

Au cours des tests, nous allons changer un ou deux paramètres à chaque fois pour étudier son

[23] U : Distribution uniforme

influence (leurs influences) sur la solution.

Nous analysons d'abord le paramètre q_0, qui décide du degré d'exploration par rapport à l'exploitation. La valeur de q_0 varie de 0,1 à 0,9 avec un pas de 0,1. Le résultat concernant la performance de *PER* est illustré dans la Figure 3- 11. Les expériences montrent que les plus faibles valeurs de q_0 (entre 0,1 et 0,3) donnent de meilleurs résultats. Par conséquent, nous mettons q_0=0,1.

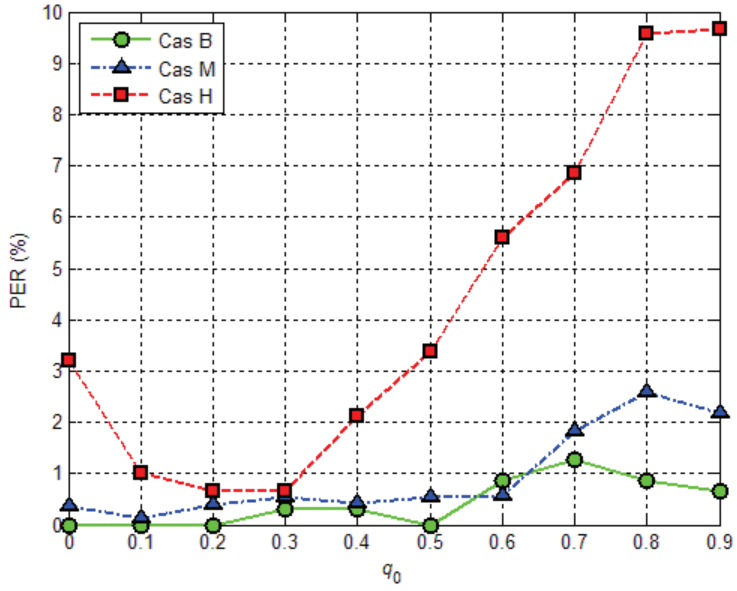


Figure 3- 11. Analyse du paramètre q_0

Ensuite, nous testons les paramètres α et ρ qui sont utilisés pour la mise à jour locale et globale de phéromones. Ils décident de la vitesse d'évaporation des phéromones. Les deux paramètres varient de 0 à 0,9 avec un pas de 0,1. Les valeurs pour les autres paramètres sont les suivantes :

$$\beta = 2 \quad q_0 = 0{,}1 \quad m = 10$$

Nous considérons toutes les combinaisons des paramètres α et ρ dans les cas B, M et H. Les résultats sont résumés dans le Tableau 3- 3.

Tableau 3- 3. Analyse de paramètre α et ρ

1. Cas B

ρ \ α	**0**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0	0	0	0	0	0,31	0	0	0	0
0,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. Cas M

ρ \ α	**0**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
0	0	0,38	0,13	0,63	0,65	0,37	0	0,12	0,12	0,75
0,1	0	0,13	0	0	0	0	0,13	0,14	0,13	0
0,2	0,25	0	0	0	0	0,14	0	0,13	0,13	0,13
0,3	0	0	0,13	0	0,26	0	0	0	0,13	0,14
0,4	0,12	0	0,14	0,14	0	0,13	0,13	0	0,27	0,27
0,5	0	0	0,26	0	0,12	0,39	0	0,13	0,51	0,12
0,6	0,13	0,27	0	0,13	0	0	0,13	0,13	0	0,13
0,7	0,13	0,13	0,12	0	0	0	0,26	0,13	0	0,13
0,8	0	0	0,26	0	0,13	0,25	0	0	0,13	0,12
0,9	0,26	0	0,13	0,25	0	0,14	0	0,13	0	0,13

3. Cas H

ρ \ α	**0**	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
0	1,49	1,57	2,21	2,27	2,53	2,09	2,33	2,00	2,51	3,13
0,1	0,92	1,18	0,72	0,58	1,09	0,72	1,16	1,37	1,28	1,22
0,2	0,73	1,37	0,86	0,80	1,29	1,15	1,20	1,00	1,29	0,88
0,3	0,95	1,01	1,01	1,02	1,10	0,93	1,29	1,50	0,70	1,10
0,4	0,72	0,79	1,10	1,16	1,30	1,54	0,93	1,58	1,29	1,21
0,5	1,15	1,45	1,16	0,88	0,92	1,30	1,01	1,43	0,87	1,00
0,6	1,31	1,22	0,74	1,20	1,38	1,02	1,08	1,17	0,80	1,29
0,7	1,53	0,94	0,86	1,08	1,38	1,01	1,07	1,31	1,01	0,84
0,8	1,08	1,38	1,58	1,31	1,10	1,00	1,39	1,08	1,23	1,36
0,9	0,8	1,08	1,22	1,00	1,23	1,08	0,72	1,39	1,16	0,86

Nous remarquons que la combinaison de $\alpha = 0{,}3$ et $\rho = 0{,}1$ donne la valeur minimale de *PER*.

Après, nous présentons l'analyse du paramètre β. Il reflète l'importance de l'information heuristique pour la règle de déplacement local. La valeur de β varie de 0 à 5 avec un pas de 1. Les valeurs des autres paramètres sont: $\alpha = 0{,}3$ $\rho = 0{,}1$ $q_0 = 0{,}1$ $m = 10$. Les résultats des expérimentations sont montrés dans la Figure 3- 12.

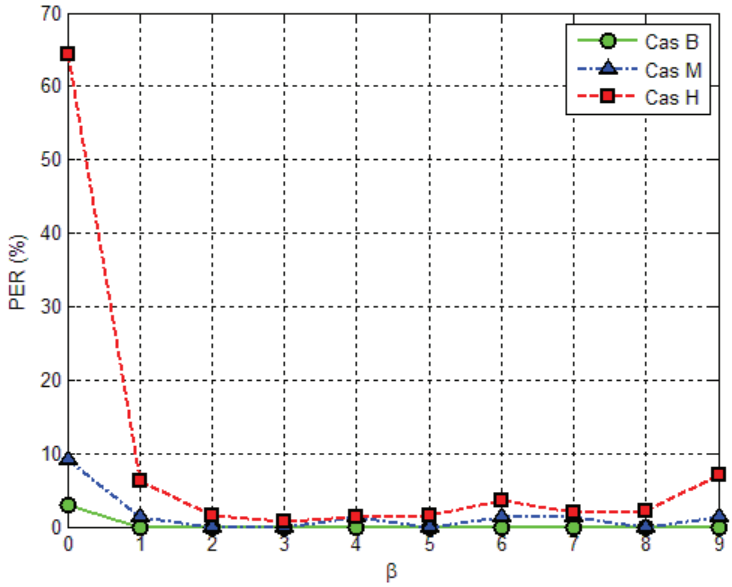
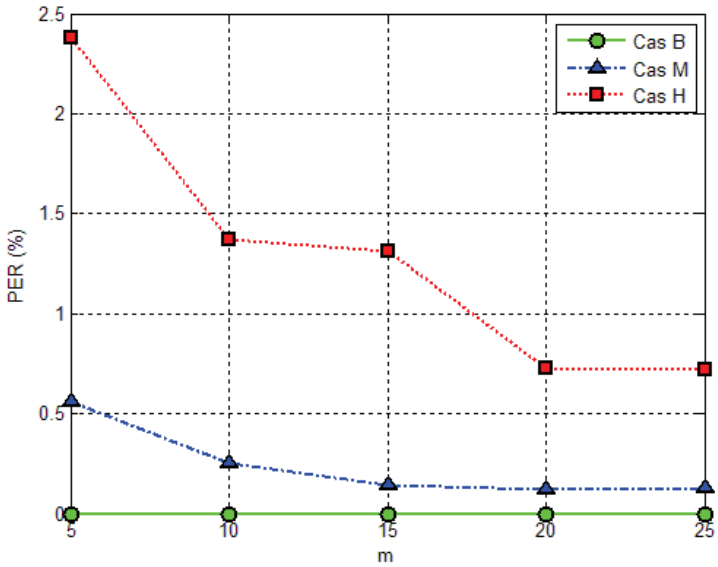


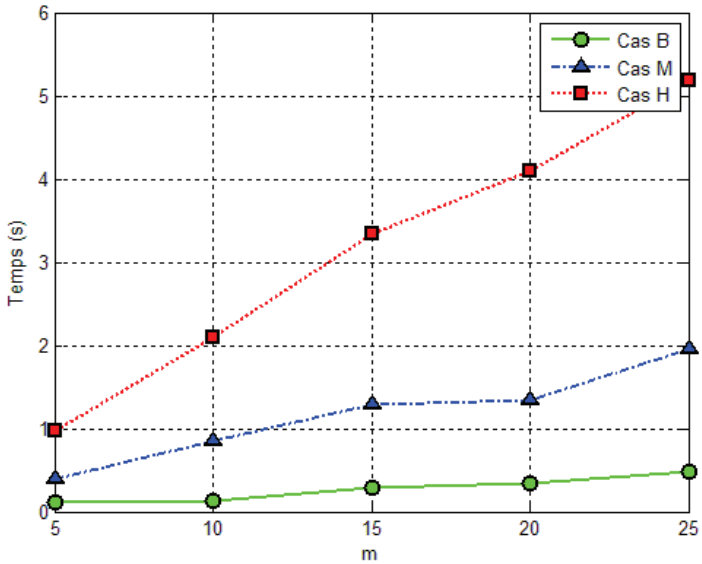
Figure 3- 12. Analyse du paramètre β

Nous remarquons qu'il est préférable d'affecter 3 à β. En outre, dans tous les cas, et en particulier dans le cas H, lorsque β est égal à 0, les performances de l'algorithme sont très faibles. Cela nous certifie que l'information heuristique joue un rôle très important dans l'algorithme.

Finalement, nous considérons deux paramètres particuliers, à savoir m et C. Les deux décident non seulement de la précision de la solution, mais aussi du temps de calcul. En effet le temps de calcul est de l'ordre $\Theta(4Cmn)$. Nous analysons d'abord le paramètre m qui indique le nombre de fourmis. Dans les expériences suivantes, m varie de 5 à 25 avec un pas de 5 avec : $\alpha = 0{,}3$ $\beta = 3$ $\rho = 0{,}1$ $q_0 = 0{,}1$ $C = 5$. La Figure 3- 13 montre les résultats concernant la performance *PER* et le temps de calcule. Nous pouvons constater que la qualité de la solution s'améliore avec l'augmentation de la valeur m. Cependant, en tenant compte de l'exigence temps réel de l'application, il faut faire des compromis entre la qualité de la solution et la charge de calcul. Nous prenons ainsi la valeur 5 pour m.



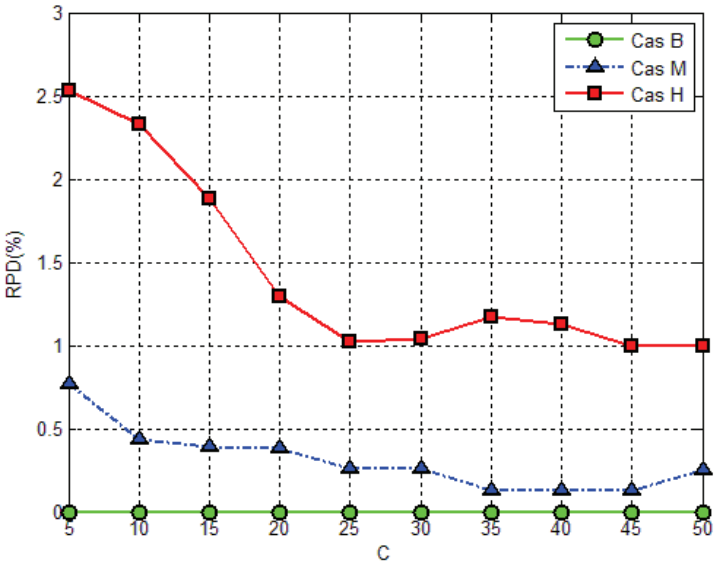
(a) *PER*



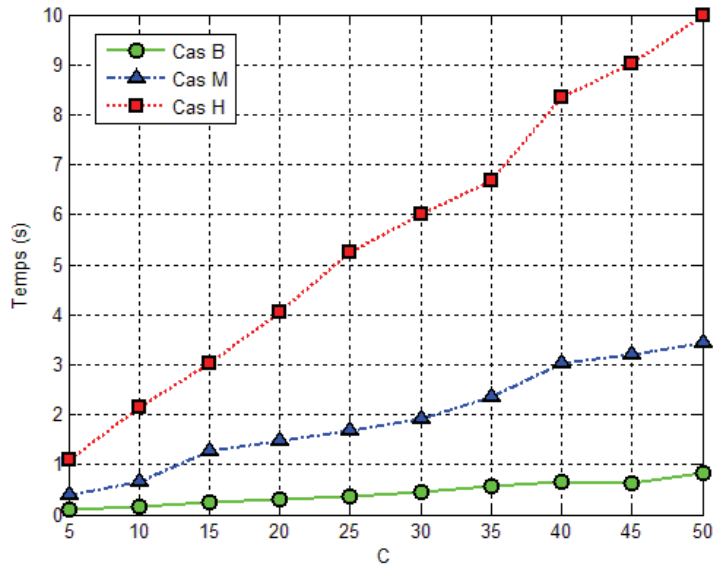
(b) Temps de calcule

Figure 3- 13. Analyse du paramètre *m*

Maintenant, nous examinons le dernier paramètre C, qui concerne la condition d'arrêt de l'algorithme. Comme le paramètre m, C détermine à la fois la précision de la solution et la charge de calcul. Dans les expériences suivantes, C prend les valeur de 5 à 50 avec un pas de 5 avec : $\alpha = 0{,}3 \;\; \beta = 3 \;\; \rho = 0{,}1 \;\; q_0 = 0{,}1 \;\; m = 5$. Les résultats sont présentés dans la Figure 3- 14. Le compromis entre la qualité de solution et la charge de calcul nous conduit vers le choix de C=5.



(a) *PER*



(b) Temps de calcul

Figure 3- 14. Analyse du paramètre C

A partir des résultats présentés précédemment, les paramètres de l'algorithme sont comme suit : $\alpha = 0{,}3 \;\; \beta = 3 \;\; \rho = 0{,}1 \;\; q_0 = 0{,}1 \; m = 5 \;\; C = 5$.

Exemple du fonctionnement de l'algorithme de colonies de fourmis

Nous appliquons l'algorithme de colonies de fourmis à l'exemple introduit dans le Tableau 3- 1. Pour initialiser la quantité de phéromone, L_0 est calculé afin de composer un peloton compact (voir Figure 3- 6). Ainsi, $\tau_0 = (n \cdot L_0)^{-1} = \frac{1}{9\times26} = 0{,}0043$.

Ensuite, Algorithme 3- 2 est appliqué pour trouver le plus court chemin. Le temps de calcul est de 0,17 s. La Figure 3- 15 nous donne le plus court chemin qui est marqué en rouge. Ici, nous ne détaillons pas tous les arcs. Seulement les arcs construisant le plus court chemin sont présentés dans la figure. Le chiffre sur chaque nœud indique le temps d'évacuation du véhicule correspondant. On peut y lire que la séquence de nœuds sur ce chemin est la même que celle trouvée par la programmation dynamique (Voir Figure 3- 5).

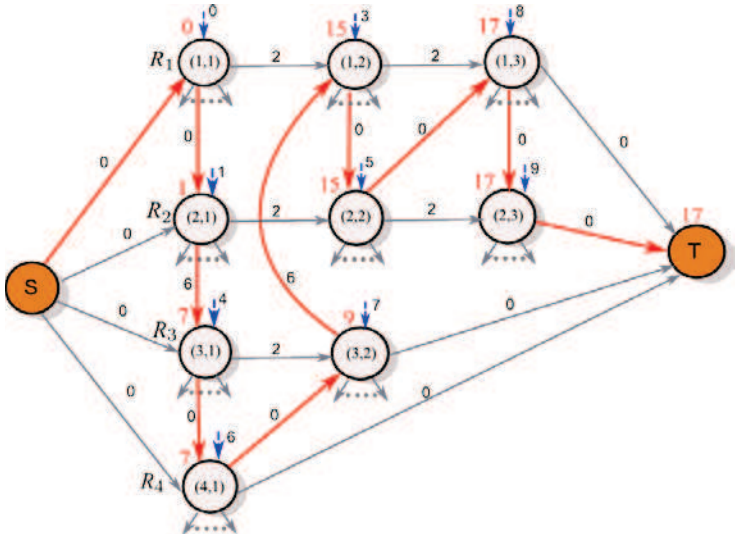


Figure 3- 15. Le plus court chemin $C^*(S,T)$ trouvé par l'algorithme de colonies de fourmis

Nous remarquons que pour l'exemple présenté, l'heuristique proposée et l'algorithme de colonies de fourmis nous offrent les mêmes résultats que la programmation dynamique. Néanmoins, nous nous intéressons à leurs performances pour toutes les instances possibles. Nous allons discuter les qualités de ces algorithmes dans la partie suivante.

3.2.4. Qualité des algorithmes proposés

La qualité d'une heuristique se rapporte généralement à deux objectifs contradictoires : la précision et la vitesse. Elle peut s'évaluer selon les deux approches suivantes [J.Cook, H.Cunningham et al. 1997; Schrijver 2003; Burke et Kendall 2005; Thomas, Charles et al. 2009] :

- ***Approche empirique*** : Ceci peut être réalisé à travers l'évaluation de la qualité de la solution par rapport à la solution optimale. Un benchmark est utilisé pour cette évaluation;
- ***Approche mathématique*** : il faut démontrer analytiquement que l'algorithme garantisse un certain niveau de performances.

Ici nous adoptons l'approche empirique pour évaluer l'algorithme de colonies de fourmis. Nous comparons d'abord la précision entre l'heuristique présentée dans 3.2.2 et l'algorithme de colonies de fourmis. Deux facteurs sont pris en compte : le ***PER*** (voir (3.14)) et le pourcentage du nombre de solution optimale engendrée (***PNSO***). Cinquante instances de test sont générées

pour chaque niveau, à savoir B (Bas), M (Moyen) et H (Haut). Pour plus de précisions voir le Tableau 3- 2.

Le Tableau 3- 4 présente le résultat concernant la précision. Nous remarquons que l'heuristique montre une plus grande précision par rapport à l'algorithme de colonie de fourmis. En effet, la solution trouvée par l'heuristique est plus proche de la solution optimale lorsque les débits des arrivées de véhicules sont élevés. Au contraire, l'algorithme de colonie de fourmis fonctionne mieux lorsque les débits sont faibles. Ce constat s'applique aussi pour la proportion de solutions optimales obtenues (*PNSO*).

Tableau 3- 4.Comparaison concernant la précision

Niveau	Heuristiques				Algorithme de Colonies Fourmis			
	PER			Moyenne PNSO	PER			Moyenne PNSO
	Minimum	Maximum	Moyenne		Minimum	Maximum	Moyenne	
B	0%	9,68%	1,47%	70%	0%	3,13 %	0,232%	93%
M	0%	4,95%	0,45%	72%	0%	3,90%	0,56%	66%
H	0%	1,90%	0,34%	60%	0%	5,19%	2,45%	8%

On réalise une autre comparaison entre les trois méthodes : la programmation dynamique, l'heuristique et l'algorithme de colonie de fourmis, d'un point de vue de temps de calcul. Les résultats sont montrés dans le Tableau 3- 5. Avec l'augmentation des débits de véhicules, les trois méthodes exigent plus de temps de calcul. Néanmoins nous pouvons rapidement distinguer la programmation dynamique qui est gourmande en temps de calcul et l'heuristique qui converge en des temps très courts.

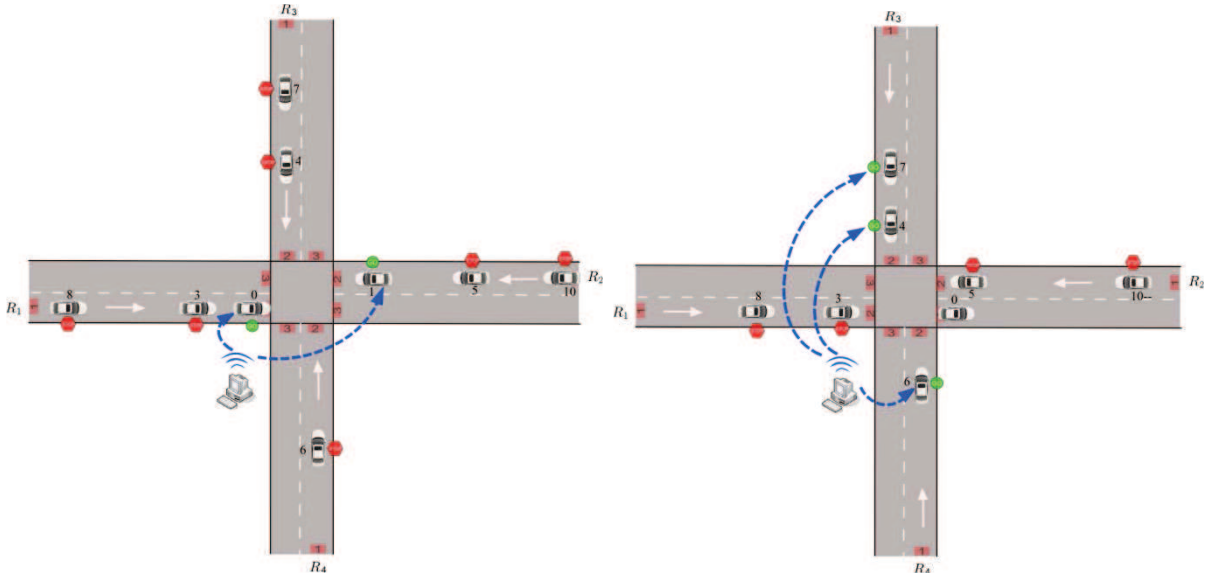
Tableau 3- 5. Comparaison concernant la moyenne du temps de calcul (secondes)

Niveau	Programmation dynamique	Heuristiques	Algorithme de Colonies Fourmis
B	0,1439	0,0416	0,0832
M	10,1722	0,1789	0,3642
H	350,2716	0,2364	0,9939

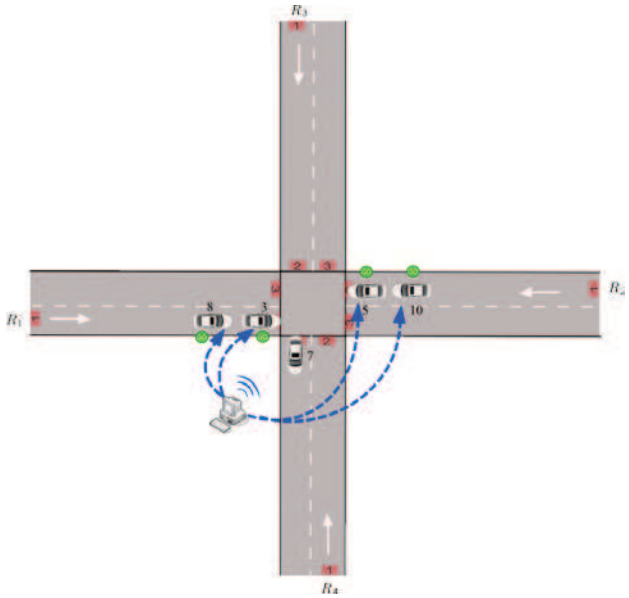
En résume, les comparaisons ci-dessus nous montrent que l'heuristique est plus rapide et plus stable, même au niveau H. Cependant, à cause de la nature dynamique de l'application étudiée, il faut comparer ces trois approches face à une simulation microscopique du trafic.

3.2.5. Application aux véhicules conduits par l'homme

Les trois algorithmes, à savoir la programmation dynamique, l'heuristique, et l'algorithme de colonies de fourmis, sont comparés à travers une série de simulations de l'intersection ordinaire montrée dans la Figure 3- 1. Nous soulignons qu'en réalité, avec l'aide des trois marqueurs de position, le temps d'évacuation peut être réduit si le véhicule quitte la zone de conflit plus rapidement que prévu (L = 6 s) car celui-ci permettra de vérifier la sortie du dernier véhicule. La Figure 3- 17 nous montre les résultats de simulations du comportement microscopique des véhicules selon la séquence optimal obtenue (voir la Figure 3- 5). L'infrastructure distribue d'abord les clés aux premiers véhicules des rues R_1 et R_2 (Figure 3- 16 (a)). Dès qu'ils ont traversé la zone de conflit, l'infrastructure envoie les droits de passage aux véhicules en conflit (Figure 3- 16 (b)). Après la sortie du dernier véhicule, l'infrastructure attribue le droit de passage aux véhicules restants (Figure 3- 16 (c)). Nous pouvons remarquer que dans la Figure 3- 17 les derniers véhicules des rues R_1 et R_2 reçoivent le droit de passage à 11 s au lieu de 15 s. Ainsi, le temps d'évacuation est moins important que prévu, à condition que le temps de communication soit nul.



(a) (b)



(c)

Figure 3- 16.Séquence optimale de passage des véhicules montrée dans la Figure 3- 5 : les dates d'arrivée théorique des véhicules sont marquées à côte des véhicules

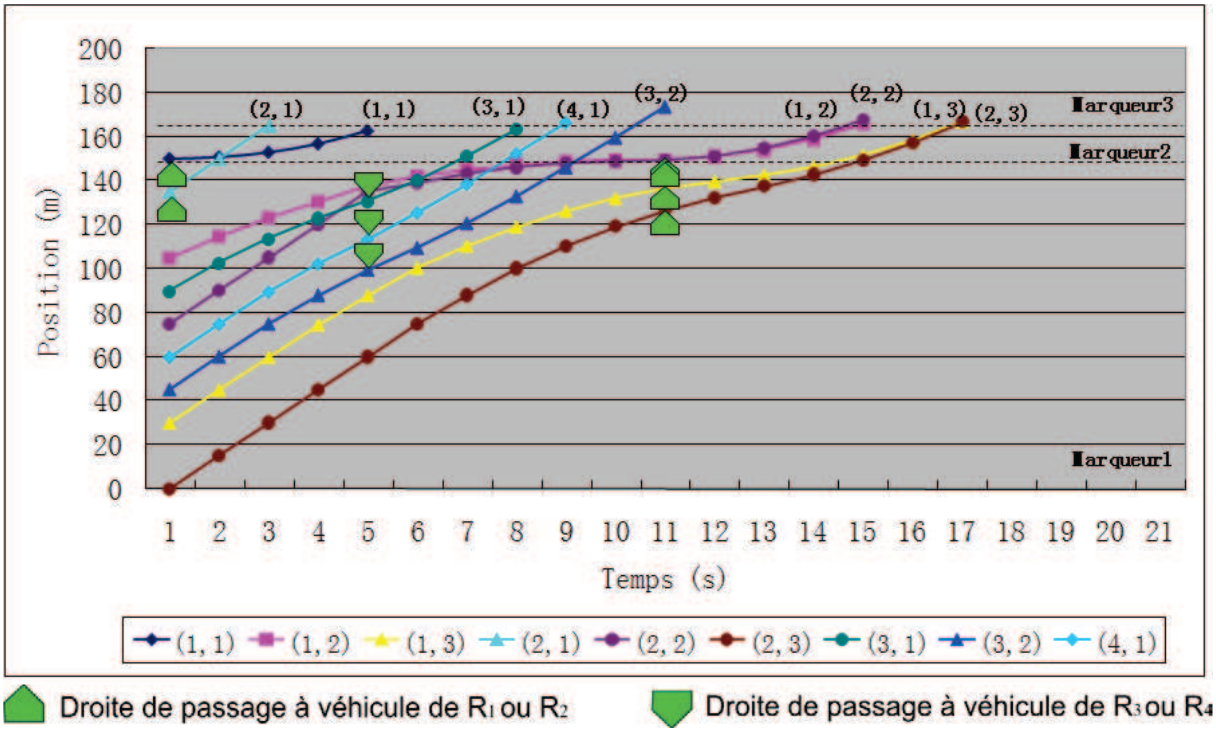


Figure 3- 17. Simulation microscopique du régulateur SVAC centralisé

Maintenant, nous effectuons des simulations avec des débits d'arrivées allant de 0,05 *u.v.p./s/voie* à 0,5 *u.v.p./s/voie*. L'environnement de simulation est basé sur le modèle du véhicule suiveur, comme dans le chapitre précédent. Les résultats de simulation sont montrés dans les figures allant de la Figure 3- 18 à la Figure 3- 21. Chaque valeur représente une moyenne de dix simulations indépendantes, où chaque simulation fonctionne une heure.

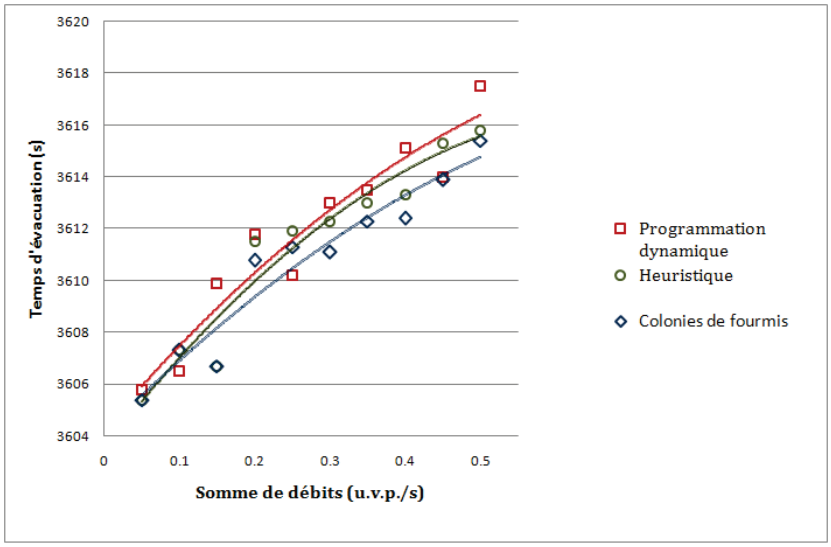


Figure 3- 18. Comparaison des temps d'évacuation (Programmation dynamique, heuristique et Colonies de fourmis)

La Figure 3- 18 nous donne le temps nécessaire pour évacuer tous les véhicules présents pendant une heure. Nous marquons que l'algorithme de colonies de fourmis et l'heuristique sont légèrement meilleurs que la méthode de programmation dynamique. Néanmoins, les trois méthodes sont très proches et la différence est d'au plus 5 *s*.

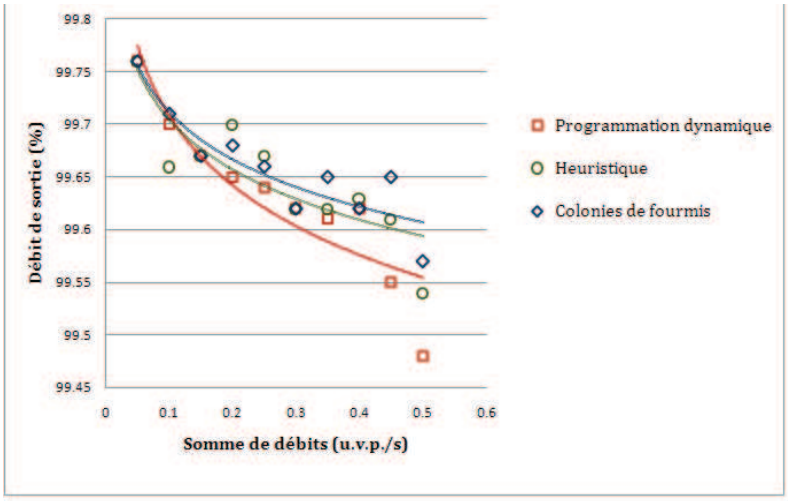


Figure 3- 19. Comparaison des débits de sortie des véhicules (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis)

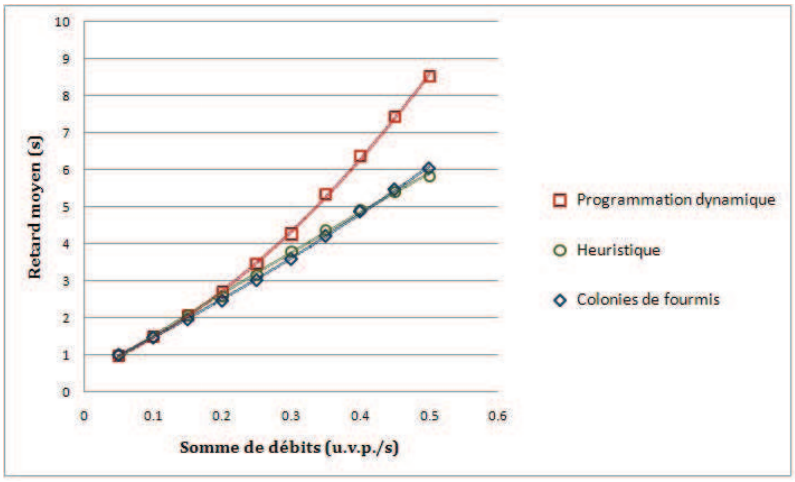


Figure 3- 20.Comparaison du retard moyen (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis)

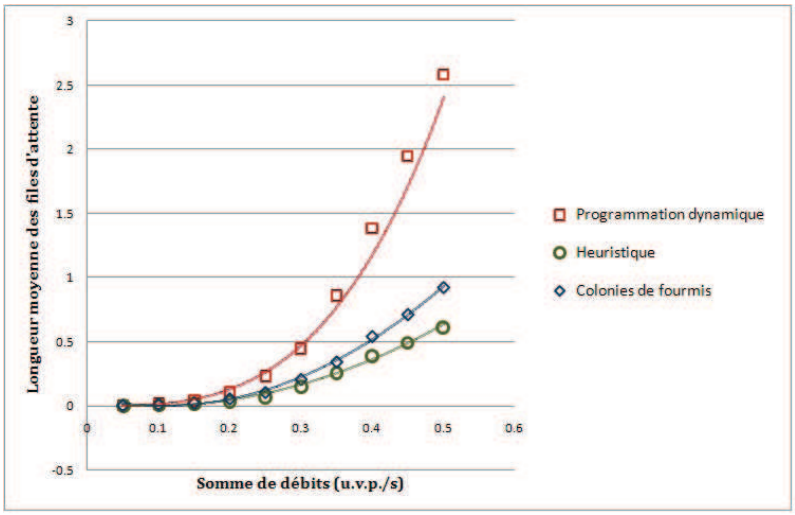


Figure 3- 21. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis)

La Figure 3- 19 nous montre le pourcentage du débit de sortie qui est évalué par le ratio entre le nombre de véhicules effectivement sortis et le nombre de véhicules entrants pendant une heure. La Figure 3- 20 nous donne le retard moyen subi par chaque véhicule. Cette valeur est calculée par la différence entre le temps de trajet réel et le temps de trajet théorique. La Figure 3- 21 présente la longueur moyenne des files d'attente pendante une heure. Nous remarquons que les performances de ces trois algorithmes sont très proches. Cependant, l'heuristique et l'algorithme de colonies de fourmis sont légèrement meilleurs que la programmation dynamique. Ceci est dû aux deux faits suivants :

1- Ecart de temps inter-véhiculaire L : Si la valeur pratique de L est inférieure à celle du L théorique, la programmation dynamique peut retarder l'entrée de certains véhicules. En effet, même si l'heuristique et l'algorithme de colonies de fourmis dépendent de l'estimation de L, ils se comportent de manière différente puisque les deux algorithmes reposent principalement sur le principe du « voisin proche », c'est à dire qu'ils n'interrompent pas le passage des véhicules rapprochés.
2- Stratégie de vider l'intersection au plus tôt : Le caractère dynamique de l'intersection empêche l'optimisation globale, comme nous l'avons démontré dans le chapitre précédent. En effet, l'optimisation d'un critère particulier pour chaque série d'arrivée de véhicules ne garantit pas l'optimalité de la régulation de l'ensemble des arrivées de véhicules.

Ces deux faits rappellent que dans le chapitre 2, une autre stratégie est proposée pour contrôler une intersection élémentaire. Bien que l'algorithme soit simple, il nous a donné de bonnes performances. Cela nous pousse à réfléchir à l'extension de cette stratégie pour réguler le trafic dans une intersection plus complexe.

3.3. Régulateur SVAC décentralisé

Pour simplifier le problème (2.3) dans le chapitre précédent, nous avons supposé que le réseau de Petri fonctionne à vitesse maximale. Cependant, dans le cas de l'intersection à quatre branches ceci exige à chaque instant la présence soit de deux véhicules qui sont en train de traverser la zone de conflit, soit de deux véhicules qui sont prêts à franchir le deuxième marqueur de position. Ces deux cas ne couvrent pas l'ensemble des conflits rencontrés par le système de régulation. En effet, le conflit persiste lorsque chaque paire des mouvements sans conflit a au moins un véhicule prêt pour traverser la zone de conflit. Dans cette partie, nous traiterons les différents cas de conflit séparément. Quatre scénarios sont déduits (Voir Figure 3-22):

1) **Scénario 1** : Pour chaque mouvement, un véhicule est prêt à traverser la zone de conflit;
2) **Scénario 2** : Pour chaque paire de mouvements sans conflit, un seul véhicule est prêt à traverser la zone de conflit. Cependant il y a deux rues où aucun véhicule n'est présent dans la zone de stockage;
3) **Scénario 3** : Chaque paire de mouvements sans conflit a un véhicule prêt à traverser la zone de conflit. Mais les autres mouvements observent au moins un véhicule présent dans la zone de stockage;
4) **Scénario 4** : Chaque paire de mouvements sans conflit a un véhicule prêt à traverser la zone de conflit avec une seule rue vide et une rue qui observe la présence d'au moins un véhicule dans la zone de stockage.

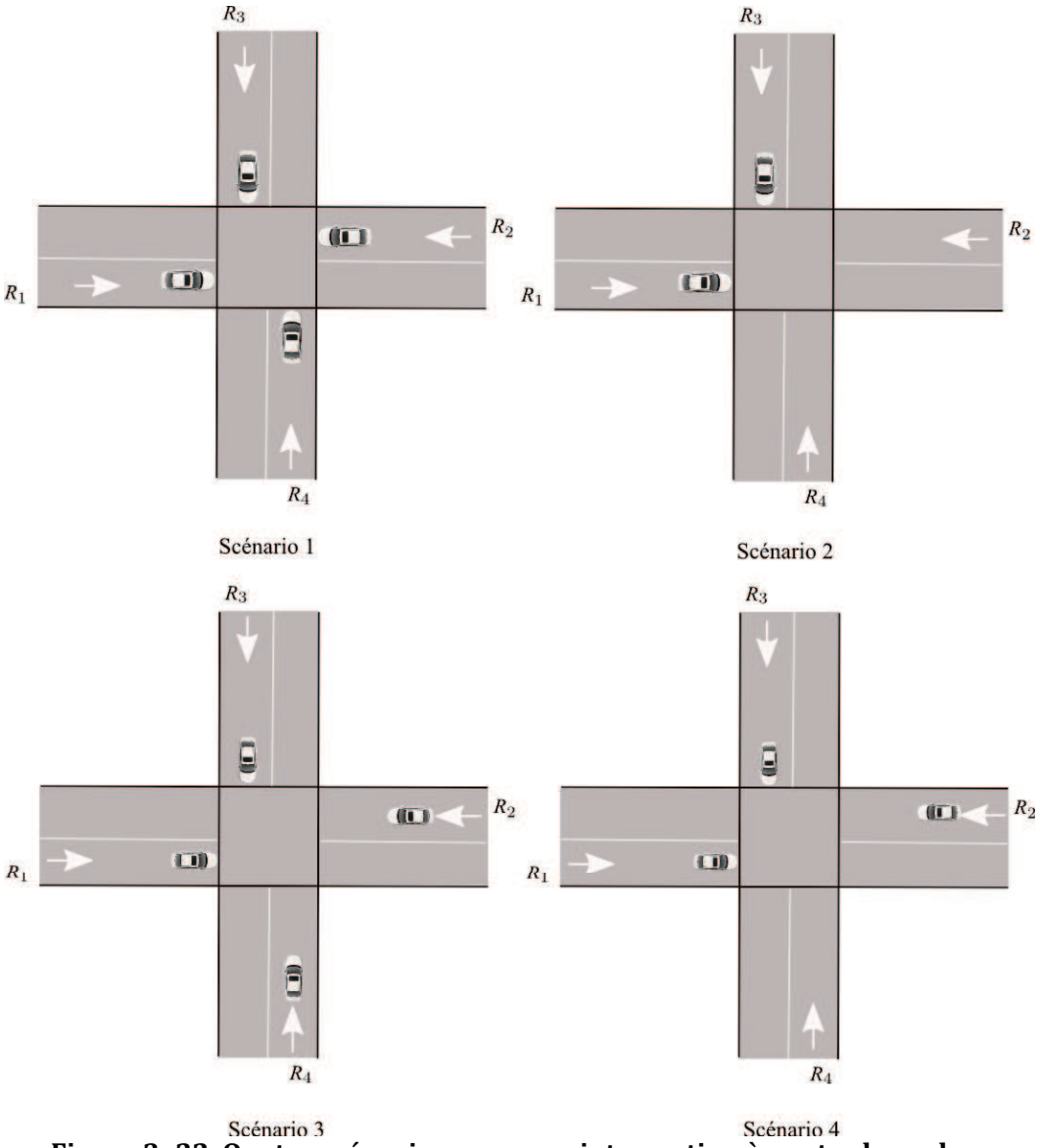


Figure 3- 22. Quatre scénarios pour une intersection à quatre branches

3.3.1. Minimisation instantanée de la longueur de la file d'attente

Comme nous l'avons annoncé précédemment nous étudions chaque scénario séparément:

1) Scénario 1 : Pour chaque mouvement, un véhicule est prêt à traverser la zone de conflit. Nous avons les égalités suivantes d'après le modèle montré dans la Figure 3- 3:

$$\begin{cases} v_1(t) + v_2(t) = 2 + v_1(t-d) + v_2(t-d) + 2 \times v_{34-12}(t-L') - 2 \times v_{12-34}(t) \\ v_3(t) + v_4(t) = v_3(t-d) + v_4(t-d) + 2 \times v_{12-34}(t-L') - 2 \times v_{34-12}(t) \end{cases} \quad (3.15)$$

Supposons que d=1 et L'=s'd.

Rappelons que le critère consiste à minimiser instantanément la longueur de la file d'attente, à savoir $J(t) = \sum_{i=1}^{4} q_i(t) = \sum_{i=1}^{4} e_i(t) - \sum_{i=1}^{4} v_i(t)$ pour tout t.

Nous définissons $\boldsymbol{V}(t) = \begin{bmatrix} v_1(t) + v_2(t) \\ v_3(t) + v_4(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{E}(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) + e_2(t) \\ e_3(t) + e_4(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{U}(t) = \begin{bmatrix} v_{12-34}(t) \\ v_{34-12}(t) \end{bmatrix}$, $\mathcal{V}(t) = \sum_i^4 v_i(t)$, $\mathcal{U}(t) = v_{12-34}(t) + v_{34-12}(t)$ et $\mathcal{E}(t) = \sum_{i=1}^4 e_i(t)$.

(3.15) peut être écrit sous la forme suivante :

$$\boldsymbol{V}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(t-d) + \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t) + \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Sous contraintes

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}(t) \leq \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(t-L') + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{V}(t) \leq \boldsymbol{E}(t) \end{cases} \tag{3.16}$$

La transformée en Z de l'égalité (3.16) nous donne :

$$\begin{bmatrix} 1 - z^{-1} & 0 \\ 0 & 1 - z^{-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} -2 & 2z^{-s'} \\ 2z^{-s'} & -2 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \dfrac{2z}{z-1} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.17}$$

Ce qui fait :

$$\boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} \dfrac{-2z}{z-1} & \dfrac{2z}{z^{s'}(z-1)} \\ \dfrac{2z}{z^{s'}(z-1)} & \dfrac{-2z}{z-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \dfrac{2z^2}{(z-1)^2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.18}$$

Ce qui implique :

$$\mathcal{V}(z) = 2z \frac{(z^{-s'} - 1)}{(z-1)} \mathcal{U}(z) + \frac{2z^2}{(z-1)^2} \tag{3.19}$$

Il résulte de la transformée inverse de (3.19) :

$$\mathcal{V}(t) = -2 \sum_{i=t-s'+1}^{t} \mathcal{U}(i) + 2(t+1) \tag{3.20}$$

Alors

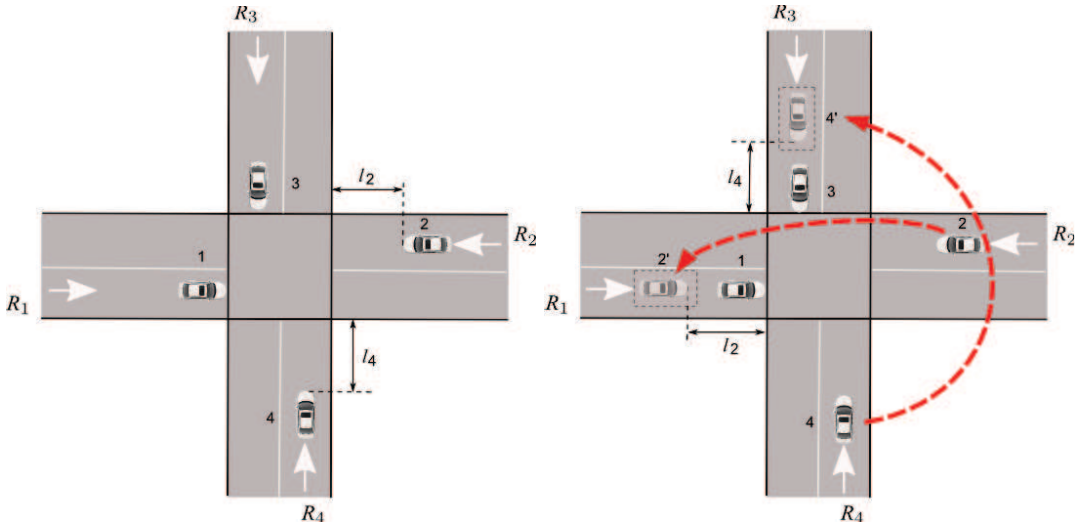
$$J(t) = \mathcal{E}(t) + 2 \sum_{i=t-s'+1}^{t} \mathcal{U}(i) - 2t - 2 \tag{3.21}$$

Nous constatons que chaque franchissement v_{12-34} et v_{34-12} est pénalisant vis-à-vis de la longueur de la file d'attente. Alors, la solution optimale consiste à privilégier le passage des véhicules du même mouvement par rapport au passage des véhicules du mouvement

conflictuel. Il s'agit d'une conclusion similaire à celle que nous avons obtenue dans le chapitre précédent.

2) **Scénario 2** : Pour chaque paire de mouvements sans conflit, un seul véhicule est prêt à traverser la zone de conflit. Mais il y a deux rues où aucun véhicule n'est présent dans la zone de stockage. Ce scénario nous ramène à l'étude de l'intersection élémentaire qui a été présenté dans le chapitre précédent. Il s'agit de maintenir l'autorisation donnée à la voie lorsque des véhicules continuent à se présenter.

3) **Scénario 3** : Chaque paire de mouvements sans conflit a un véhicule prêt à traverser la zone de conflit. Mais les autres mouvements observent au moins un véhicule présent dans la zone de stockage.



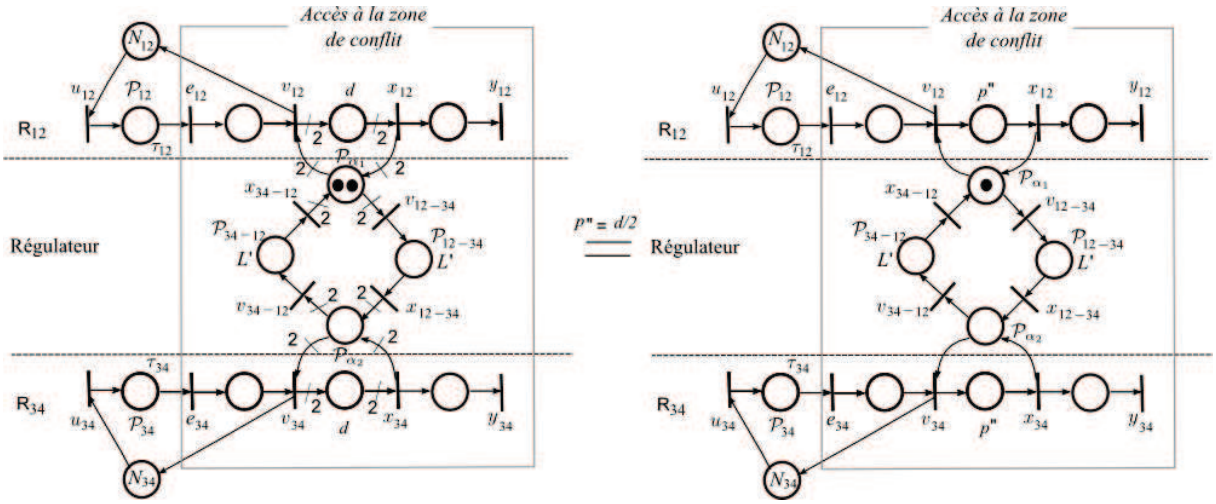
(a) Avant le mapping **(b) Après le mapping**

Figure 3- 23. Schématisation du fonctionnement du mapping pour le scénario (3)

Avant de présenter le modèle RdP pour ce scénario, nous introduisons d'abord le concept « ***mapping de véhicule*** ». Ce concept est utilisé par Uno [Uno, Sakaguchi et al. 1999; Sakaguchi, Uno et al. 2000] pour le contrôle de fusion de peloton (en anglais, merging control for platoon). Il permet de reproduire tous les véhicules provenant des mouvements sans conflit dans une même rue. Ainsi, il est possible de déduire la relation de précédence entre les véhicules selon leurs distances relatives.

A titre d'exemple, prenons le scénario présenté dans la Figure 3- 23 (a). Comme le mouvement du véhicule 2 ne dérange pas celui du véhicule 1, un véhicule virtuel (2') est reproduit dans la rue R_1, avec la même distance (l_2) de la zone de conflit (Figure 3- 23 (b)). Ainsi, nous pouvons considérer ces deux véhicules comme appartenant à la même rue. Comme les mouvements des véhicules 3 et 4 ne sont pas conflictuels, le véhicule 4 est reproduit dans la rue R_3 de la même manière (Figure 3-23 (b)).

Un modèle RdP correspondant est présenté dans la Figure 3- 24 (a). De haut en bas, le sous-modèle R_{12} pour les rues R_1 et R_2, le sous-modèle du régulateur et le sous-modèle R_{34} pour les rues R_3 et R_4. Les véhicules appartenant aux mouvements sans conflit sont reproduits dans une seule rue par le mapping. Nous proposons de simplifier ce modèle en supposant que la contrainte temporelle entre deux véhicules $p" = d/2$ (voir Figure 3- 24 (b)).

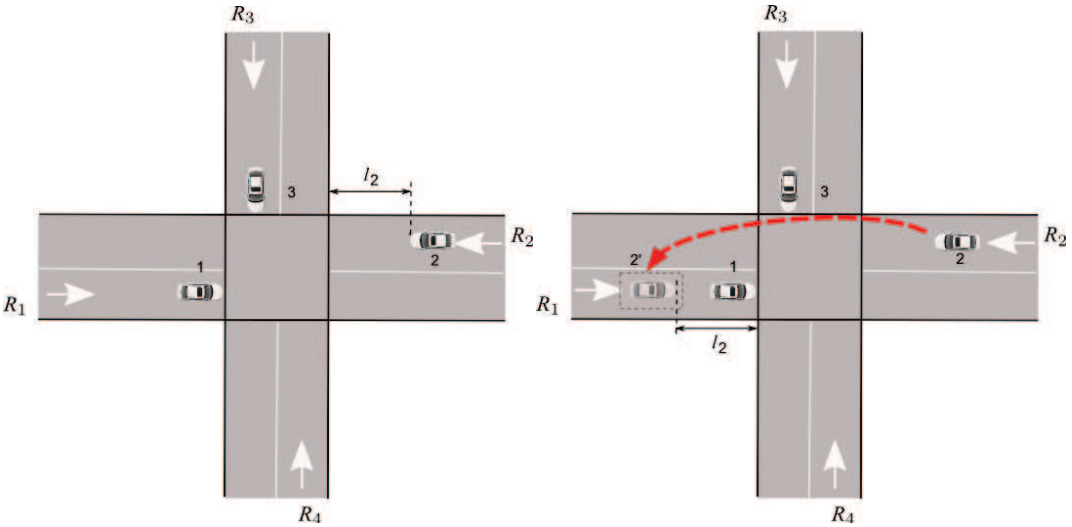


(a) **(b)**

Figure 3- 24. Modèle RdP pour le scénario (3)

Le modèle simplifié ressemble à celui présenté dans le chapitre 2. Alors, nous obtenons des résultats similaires aux deux premiers scénarios étudiés.

4) Scénario 4 : Nous considérons le dernier scénario qui est légèrement plus complexe que les trois précédents. Dans ce scénario, chaque paire de mouvements sans conflit a un véhicule prêt à traverser la zone de conflit. Il y a une rue (supposons R_4) qui n'a pas de véhicule présent dans la zone de stockage (Voir Figure 3- 25(a)). Par le mapping, les véhicules de R_2 sont reproduits dans la rue R_1 (Voir Figure 3- 25(b)).



(b) Avant le mapping **(b)Après le mapping**

Figure 3- 25. Schématisation du fonctionnement du mapping pour le scénario (4)

Le modèle RdP est présenté dans la Figure 3- 26. Ce modèle est composé de trois sous-modèles, à savoir le sous-modèle R_{12} des rues R_1et R_2, le sous-modèle du régulateur et le sous-modèle de la rue R_3. Nous pouvons simplifier ce modèle en supposant que l'espace temporel minimal entre deux véhicules des rues R_1et R_2 est la moitié de d, à savoir$p" = d/2$.

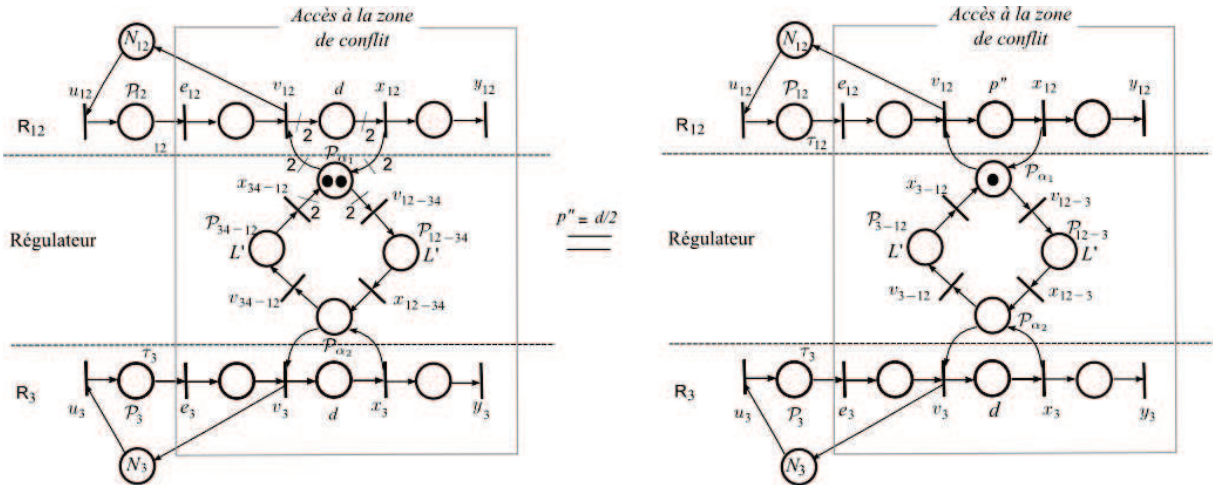


Figure 3- 26. Modèle RdP pour le scénario (4)

A partir de ce modèle, on obtient les inégalités suivantes entre les suites qui décrivent le comportement du sous-modèle du régulateur :

$$\begin{cases} v_{12}(t) \le v_{12}(t-p") + v_{3-12}(t-L') - v_{12-3}(t) + 1 \\ v_3(t) \le v_3(t-2p") - v_{3-12}(t) + v_{12-3}(t-L') \end{cases} \quad (3.22)$$

Sous contraintes

$$\begin{cases} 0 \le v_{12-3}(t) - v_{3-12}(t-L') \le 1 \\ v_{12}(t) \le e_{12}(t)\,, v_3(t) \le e_3(t) \end{cases}$$

Nous supposons que le modèle fonctionne à vitesse maximale. (3.22) peut être écrite de la manière suivante :

$$\begin{cases} v_{12}(t) = v_{12}(t-p") + v_{3-12}(t-L') - v_{12-3}(t) + 1 \\ v_3(t) = v_3(t-2p") - v_{3-12}(t) + v_{12-3}(t-L') \end{cases} \quad (3.23)$$

Rappelons que l'objectif est celui de minimiser instantanément la longueur de la file d'attente $J(t)$ pour tout t. Alors $J(t) = e_{12}(t) + e_3(t) - v_{12}(t) - v_3(t)$.

Nous définissons $\boldsymbol{V}(t) = \begin{bmatrix} v_{12}(t) \\ v_3(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{E}(t) = \begin{bmatrix} e_{12}(t) \\ e_3(t) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{U}(t) = \begin{bmatrix} v_{12-3}(t) \\ v_{3-12}(t) \end{bmatrix}$. Nous supposons que $p"$ = 1 unité de temps et L'=s' $p"$.

La transformée en Z de l'égalité (3.23) nous donne :

$$\begin{bmatrix} 1-z^{-1} & 0 \\ 0 & 1-z^{-2} \end{bmatrix} \boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} -1 & z^{-s'} \\ z^{-s'} & -1 \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \frac{z}{z-1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Ce qui fait :

$$\boldsymbol{V}(z) = \begin{bmatrix} \dfrac{-z}{z-1} & \dfrac{z}{z^{s'}(z-1)} \\ \dfrac{z^2}{z^{s'}(z^2-1)} & \dfrac{-z^2}{z^2-1} \end{bmatrix} \boldsymbol{U}(z) + \begin{bmatrix} \dfrac{z^2}{(z-1)^2} \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

Ce qui implique :

$$\begin{aligned} v_{12}(t) + v_3(t) \\ = \left(\frac{-z}{z-1} + \frac{z^2}{z^{s'}(z^2-1)}\right) v_{12-3}(t) + \left(\frac{z}{z^{s'}(z-1)} + \frac{-z^2}{z^2-1}\right) v_{3-12}(t) \\ + \frac{z^2}{(z-1)^2} \end{aligned} \tag{3.26}$$

Il résulte de la transformée inverse de (3.26) :

$$\begin{aligned} v_{12}(t) + v_3(t) \\ = -\sum_{i=t-s'+1}^{t} v_{12-3}(i) - \sum_{i=1}^{\leq \frac{t-s'+1}{2}} v_{12-3}(t-s'+1-2i) + \sum_{i=0}^{t-s'} v_{3-12}(i) - \\ - \sum_{i=0}^{\leq \frac{t}{2}} v_{3-12}(t-2i) + t + 1 \end{aligned} \tag{3.27}$$

Alors

$$\begin{aligned} J(t) = e_{12}(t) + e_3(t) + \sum_{i=t-s'+1}^{t} v_{12-3}(i) + \sum_{i=1}^{\leq \frac{t-s'+1}{2}} v_{12-3}(t-s'+1-2i) \\ - \sum_{i=0}^{t-s'} v_{3-12}(i) + \sum_{i=0}^{\leq \frac{t}{2}} v_{3-12}(t-2i) - t - 1 \end{aligned} \tag{3.28}$$

Nous constatons que chaque franchissement supplémentaire de v_{12-3} et de v_{3-12} est pénalisant vis-à-vis de la longueur de la file d'attente. Néanmoins, le terme $-\sum_{i=0}^{t-s'} v_{3-12}(i)$ dans (3.28) implique qu'il est préférable de privilégier le passage des véhicules des rues R_1 et R_2 par rapport au passage des véhicules de la rue R_3.

D'après les analyses ci-dessus, nous pouvons voir que le lemme 2-1 peut bien résoudre le conflit existant dans une intersection ordinaire. Comme nous avons vu dans le chapitre 2 plus grande est la valeur de *L'*, plus il est intéressant de donner l'autorisation aux véhicules suiveurs. La valeur de *d* détermine le véhicule suiveur : D'abord, reproduire les véhicules provenant des mouvements sans conflit dans une même rue ; Ensuite, si un véhicule est à une distance

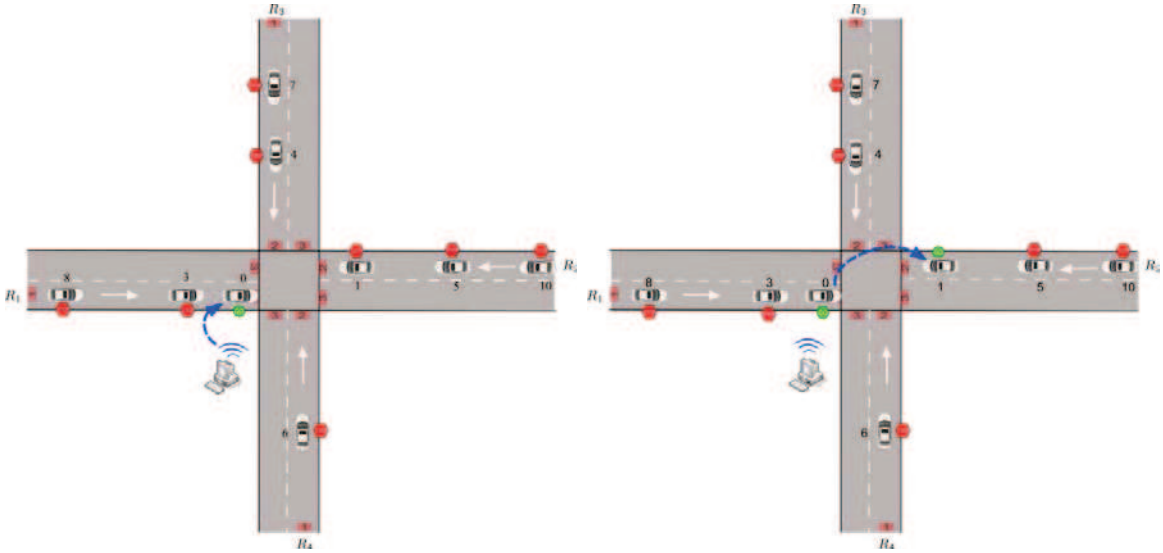
inférieure à $v_{max} \times d$ mètres du véhicule précèdent, il se considère comme un suiveur du véhicule qui précède (v_{max} est la borne supérieure de la vitesse). Après la construction du peloton, dès qu'un véhicule en tête a déverrouillé son droit de passage, il envoie la clé à son suiveur, et ainsi de suite. Lorsque le dernier véhicule passe sur le troisième marqueur de position, il restitue la clé à l'infrastructure.

Notons que nous avons résolu partiellement le conflit. En effet, quand l'infrastructure récupère la clé, elle doit déterminer quel véhicule aura la clé. Afin de réduire le temps d'attente maximale des véhicules, nous supposons que la clé doit être distribuée au véhicule qui est arrivé le plutôt. Bien que cette règle ne contribue pas à trouver une solution optimale, d'un point de vue pratique, elle permet d'évacuer les véhicules en attente depuis un long moment.

3.3.2. Exemple d'application

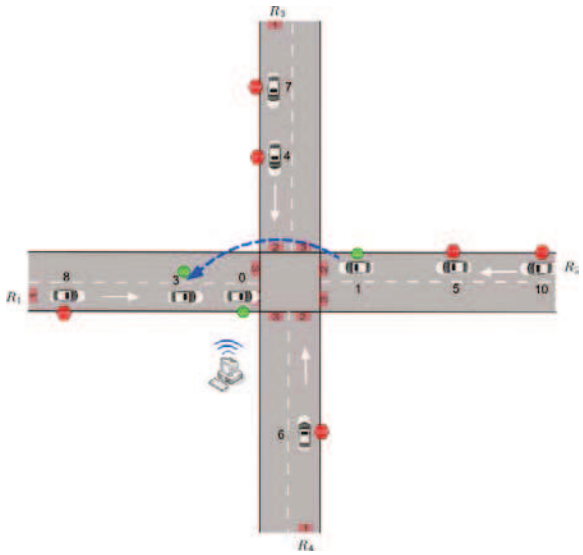
Afin d'illustrer le fonctionnement du régulateur SVAC décentralisé, nous l'appliquons à l'exemple introduit précédemment dans le Tableau 3- 1. Nous rappelons que d =2 s et que $v_{max} = 15\ m/s$.

Initialement, aucun véhicule n'a le droit de passage. En premier, seul le premier véhicule de R_1 (1,1) obtient la clé puisqu'il est le premier véhicule arrivé à l'intersection (le temps d'arrivée est de 0 s), comme le montre la Figure 3- 27(a). Le deuxième véhicule de R_1 (1,2) ne peut pas acquérir la clé puisque la distance entre les deux premiers véhicules est supérieure à 30 m. Néanmoins, par le mapping, le première véhicule de R_2 (2,1) se considère comme un suiveur du véhicule (1,1) et acquiert une clé (Figure 3- 27(b)). De la même façon, les véhicules (1,2) et (2,2) acquièrent les clés respectivement, comme le montrent les Figure 3- 27 (c)~(d). Après la sortie du dernier véhicule de ce peloton (véhicule (2,2)), la clé est restituée à l'infrastructure, voir la Figure 3- 27 (e). Ensuite, l'infrastructure s'engage à distribuer la clé de nouveau au véhicule le plus proche, à savoir le véhicule (3,1) (Figure 3- 27 (f)). La distribution des clés se poursuit de la mêm manière jusqu'au moment où l'intersection se vide (voir les Figure 3- 27 (g), (h), (i) et (j)).

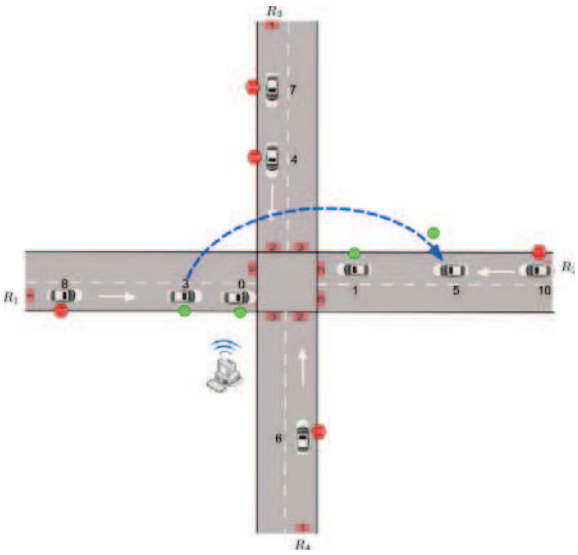


(a) L'infrastructure attribue une clé au véhicule (1,1)

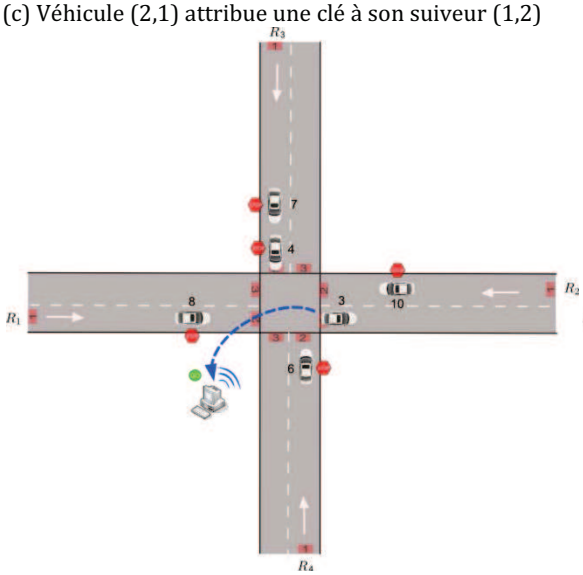
(b) Le véhicule (1,1) attribue une clé au véhicule suivant (2,1)



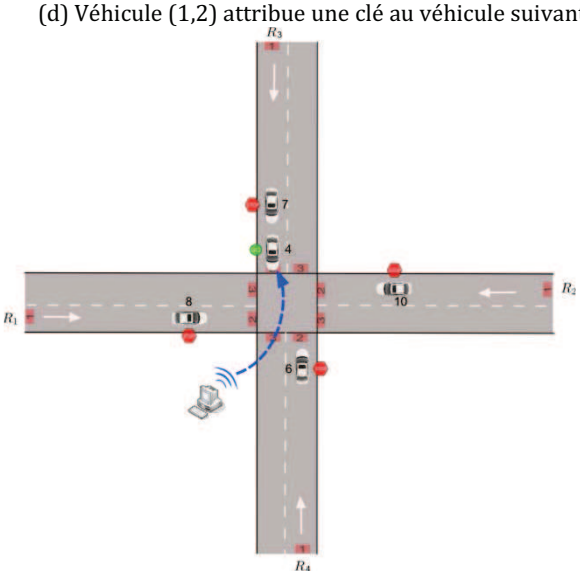
(c) Véhicule (2,1) attribue une clé à son suiveur (1,2)



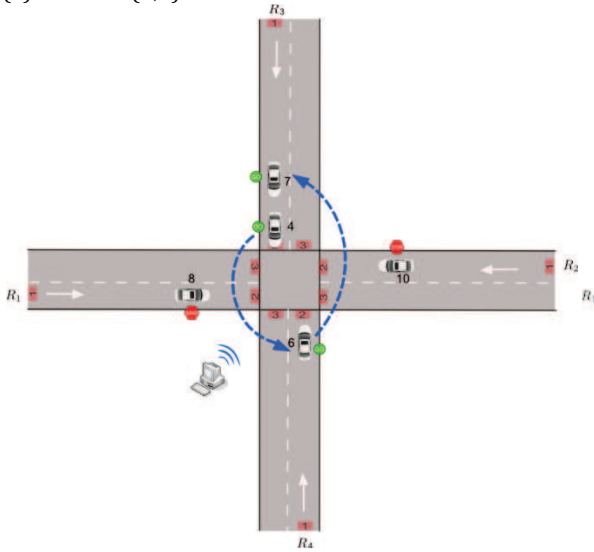
(d) Véhicule (1,2) attribue une clé au véhicule suivant (2,2)



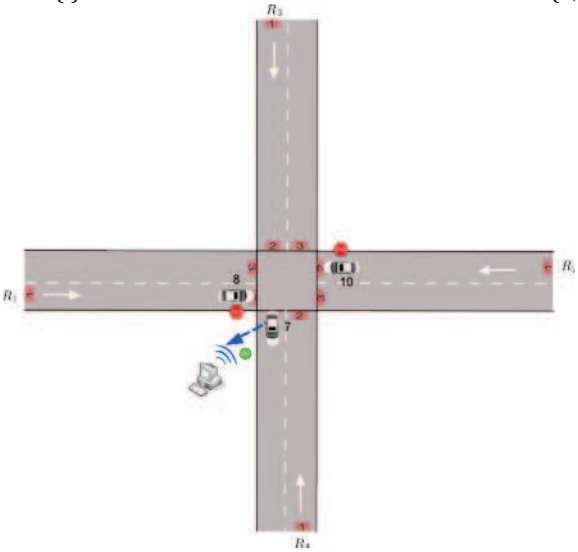
(e) Véhicule (1,2) restitue la clé à l'infrastructure



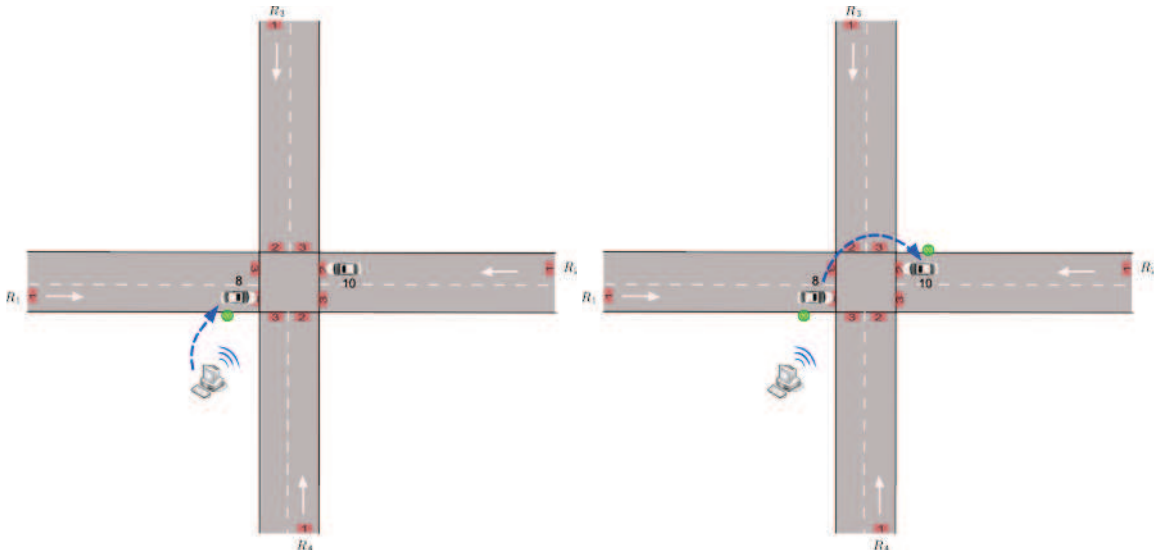
(f) L'infrastructure distribue une clé au véhicule (3,1)



(g)Clés sont distribuée dans un peloton



(h) Véhicule (3,2) restitue la clé à l'infrastructure



(i) L'infrastructure distribue les clés au véhicules (1,3) (j) La clé est envoyée à son suiveur (2,3)

Figure 3- 27. Exemple de fonctionnement du régulateur SVAC centralisé (les temps d'arrivée estimée sont marqués au-dessus chaque véhicule)

La construction d'un peloton est basée sur la détection de la distance relative entre deux véhicules. La Figure 3- 28 nous montre les trajectoires des véhicules en fonction du temps. Nous remarquons que les premiers deux véhicules de R_1 et R_2 forment initialement un peloton. Le deuxième peloton composé par les véhicules de R_3 et R_4 est formé à la 8ème seconde juste après la sortie du véhicule (1,2) et le dernier peloton est construit à la 13ème seconde.

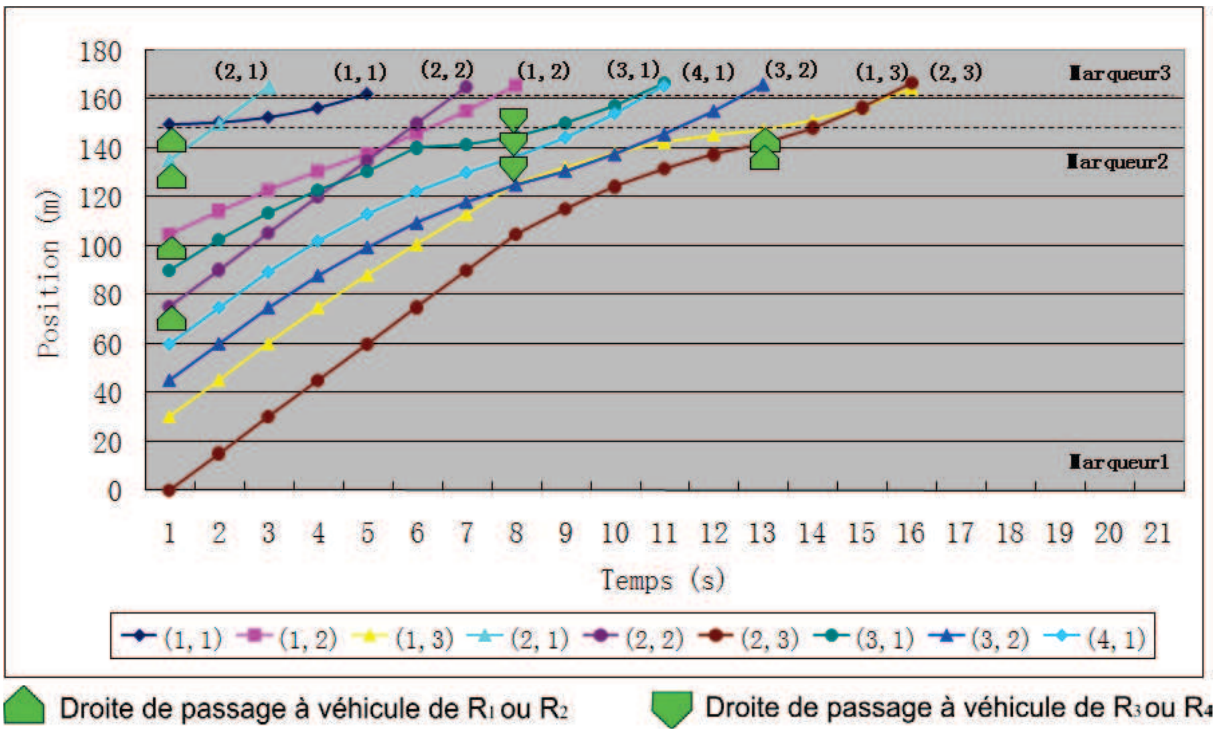


Figure 3- 28. Simulation microscopique du régulateur SVAC décentralisé

Nous notons que les avantages du régulateur SVAC décentralisé sont évidents : un temps de calcul faible et une solution intéressante. Même s'il a montré que ses performances sont similaires au régulateur centralisé dans une intersection élémentaire, il est légitime de vérifier s'il est aussi performant pour contrôler le trafic dans une intersection plus complexe. Ainsi, nous allons réaliser plusieurs simulations dans la suite.

3.4. Résultats de simulation

Dans cette section, nous effectuons des simulations pour deux objectifs :

1) Comparer les deux régulateurs proposés pour savoir si le régulateur SVAC décentralisé est aussi efficace pour contrôler le trafic dans une intersection plus complexe que le régulateur centralisé;
2) Comparer les performances du SVAC avec celles des autres quatre régulateurs comme dans le chapitre précédent. Nous les rappelons brièvement :

    - Régulateur adaptatif (**Adaptatif**) – ce régulateur utilise des détecteurs de boucle magnétique ou des caméras pour mesurer le débit de véhicules. La durée du cycle et la séquence de phases sont optimisées dans quelques secondes. Ici, nous utilisons l'approche présentée dans [Fang et Elefteriadou 2006; Fang et Elefteriadou 2008] .

    - Deux nouveaux régulateurs basés sur les technologies émergentes afin de bénéficier des données supplémentaires, telles que le nombre de véhicules d'attente dans chaque rue, la vitesse et la destination de chaque véhicule. Le premier régulateur (**NR1 (Webster)**) fonctionne comme le régulateur adaptatif précédent. Cependant, au lieu de détecteurs de boucle magnétique, il est principalement basé sur la communication V2I Le contrôle est basé sur la formule bien connue de Webster [Webster 1958a]. La durée du cycle et phases sont constamment réexaminée pour chaque cycle. Cette approche est présentée dans Gradinescu [Gradinescu, Gorgorin et al. 2007]. Le deuxième (**NR2 (LQF- MWM)**) fonctionne sur la base de la date supplémentaire obtenue par la communication sans –fil V2I et le GPS. Le droit de passage est distribué à la phase où les rues correspondantes ont la plus longue file d'attente. Cette approche est présentée dans [Wunderlich, Cuibi et al. 2008].

    - Un régulateur à base de la communication sans fil distribue les droits de passage d'après le principe **PAPS** (Premier Arrivée, Premier Servi).

Pour le deuxième objectif, nous proposons deux scénarios de simulations pour savoir si le système s'adapte bien aux demandes de trafic :

- **Simulation I** : Débits d'arrivée de véhicules uniformes. Le débit d'arrivée de véhicules dans chaque rue est quasiment identique;

- **Simulation II :** Débits d'arrivée de véhicules non uniformes. La somme des débits dans les rues R_1 et R_2 est deux fois plus grand que celle des débits observés dans les rues R_3 et R_4. La raison pour laquelle nous faisons cette simulation est pour valider le fonctionnement du régulateurs SVAC qui ne tient pas en compte explicitement des temps d'attente aux intersections. En effet, les véhicules dans les rues principales supportant un important trafic peuvent retenir longtemps les droits de passage. Ceci peut entraîner un nombre considérable de véhicules accumulés dans les rues secondaires.

L'environnement de simulation est similaire à celui-ci que nous avons introduit précédemment. Chaque simulation fonctionne pendant une heure.

3.4.1. Comparaisons entre le SVAC centralisé et le SVAC décentralisé

Comme nous l'avons annoncé précédemment, il est intéressant de savoir si le régulateur décentralisé maîtrise le trafic aussi bien que le régulateur centralisé.

Nous présentons les résultats de comparaison selon les quatre critères d'évaluation (voir la partie 2.5.1) : le temps d'évacuation (Figure 3- 29), le débit de sortie (Figure 3- 30), le retard moyen (Figure 3- 31) et la longueur moyenne de la file d'attente (Figure 3- 32). L'heuristique est utilisée pour le régulateur SVAC centralisé puisque l'heuristique est plus rapide et plus stable par rapport aux autres algorithmes pour le régulateur centralisé. Nous pouvons voir que les performances du régulateur SVAC décentralisé sont voisines de celles du régulateur centralisé, voire légèrement mieux pour des débits moyens. Ce léger avantage est dû à la mesure imprécise de *L*. Nous pouvons conclure que le régulateur SVAC décentralisé fonctionne aussi bien que le régulateur centralisé dans une intersection plus complexe.

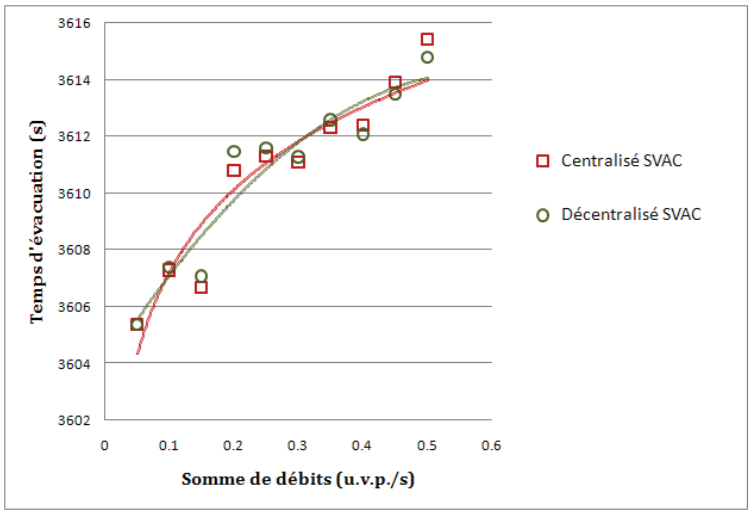


Figure 3- 29. Comparaison des temps d'évacuation de véhicules (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé)

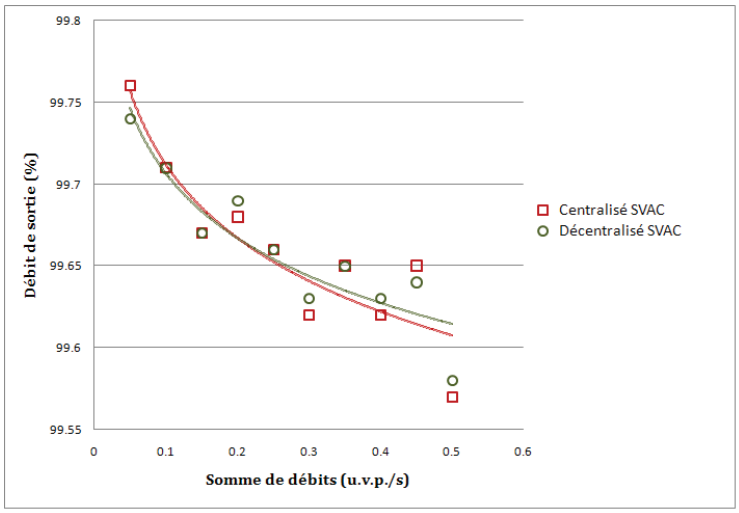


Figure 3- 30. Comparaison des débits de sortie de véhicules (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé)

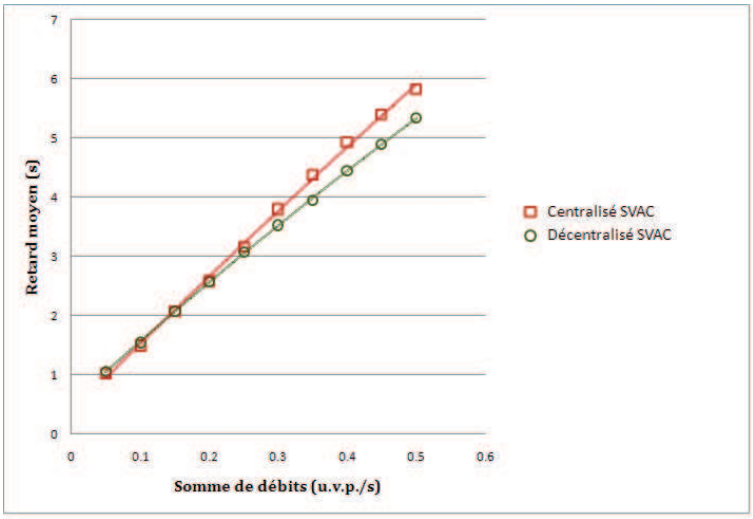


Figure 3- 31. Comparaison du retard moyen (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé)

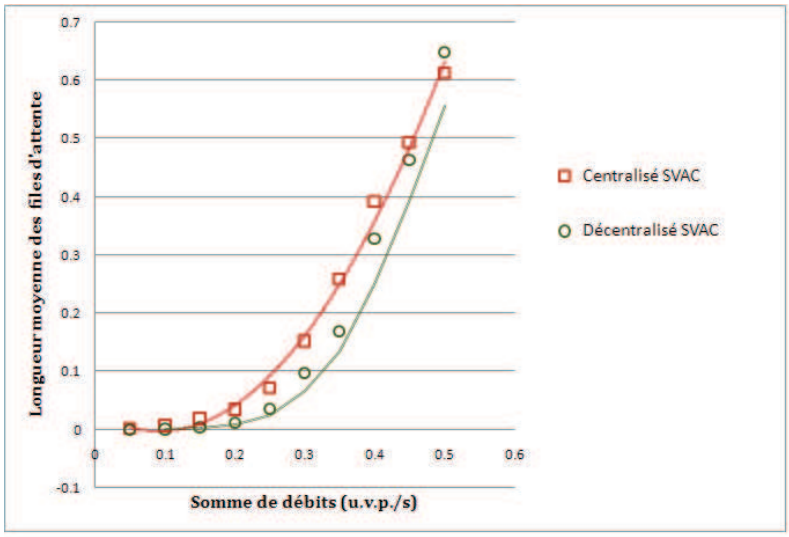


Figure 3- 32. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé)

3.4.2. Comparaisons du SVAC avec d'autres régulateurs

Simulation I : débits uniformes

Nous considérons en premier les performances des systèmes avec des débits uniformes. Les critères de performance suivants sont étudiés: le temps d'évacuation (Figure 3- 33), le débit de sortie (Figure 3- 34), le retard moyen (Figure 3- 35) et la longueur moyenne de la file d'attente (Figure 3- 36).

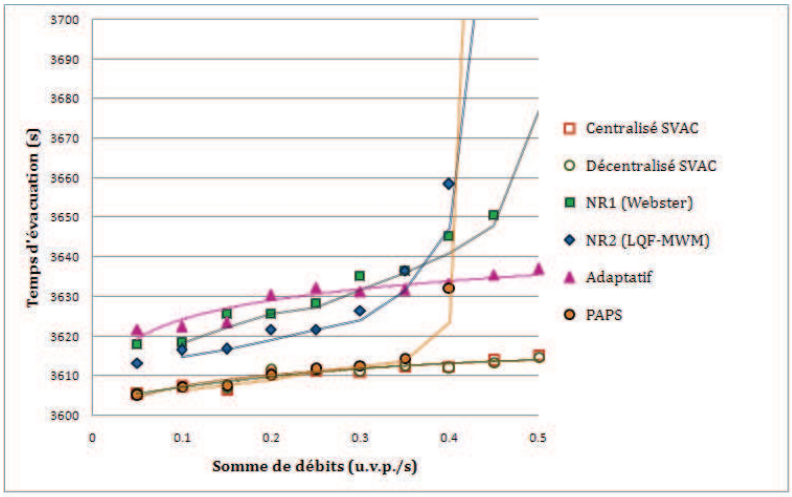


Figure 3- 33. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches avec les débits uniformes

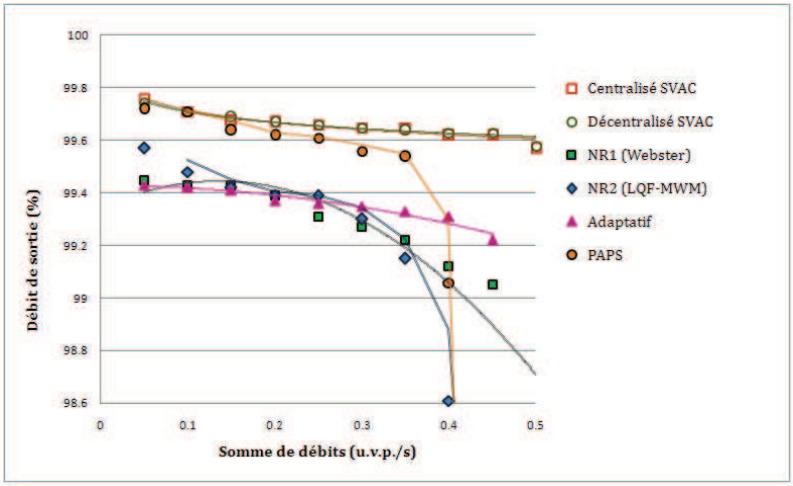


Figure 3- 34. Comparaison des débits de sortie de véhicules entres les différentes approches avec les débits uniformes

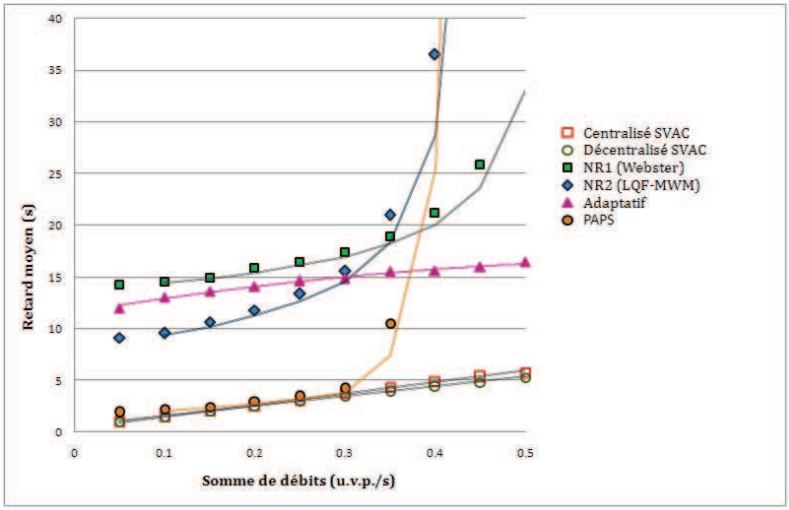


Figure 3- 35. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches avec les débits uniformes

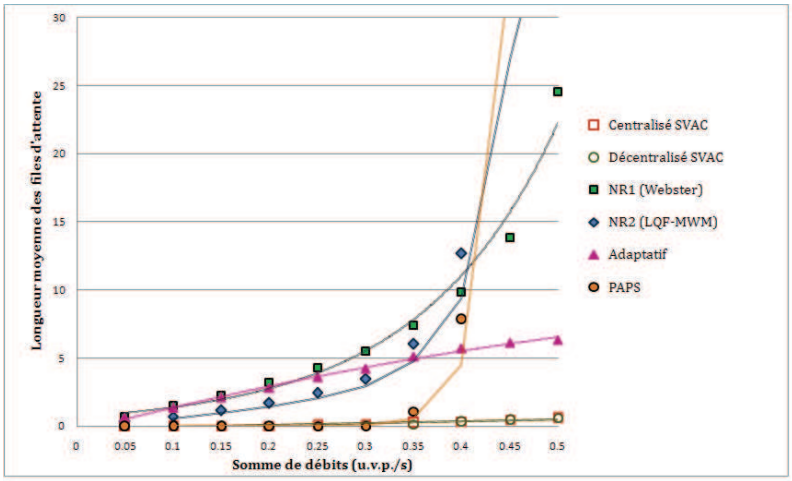


Figure 3- 36. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches avec les débits uniformes

Nous observons que les régulateurs SVAC sont performants. Le régulateur NR2 basé sur la longueur des files d'attente ne résiste pas aux situations d'affluence. Même s'il est performant lorsque les débits d'arrivée sont faibles (<0,35 *u.v.p./s*), la performance se détériore lorsque la demande du trafic s'élève. Ceci est dû au changement fréquent des couleurs des feux lorsque plusieurs véhicules s'accumulent dans toutes les rues. Le régulateur NR1 basé sur la formule de Webster résiste aux situations d'affluence mais il semble moins performant que le régulateur adaptatif. Ceci est probablement dû au fait que la formule de Webster a été développée pour le calcule d'un cycle fixe et donc suppose un calcul de débit sur un horizon de temps plus important que celui qui peut être obtenue par les dispositifs sans-fil. En ce qui concerne le régulateur PAPS, il fournit des performances similaires aux régulateurs SVAC. Cependant, lorsque la demande du trafic augmente, sa performance se détériore. En résumé, dans les cas des débits uniformes, le système SVAC se monte intéressant pour maîtriser le trafic et résistant à l'affluence du trafic.

Simulation II : débits non uniformes

Nous rappelons que dans ce scénario, la somme de débits des rues R_1 et R_2 est deux fois supérieure à celle des rues R_3 et R_4. Nous considérons les mêmes quatre critères de performance: le temps d'évacuation (Figure 3- 37), le débit de sorite (Figure 3- 38), le retard moyen (Figure 3- 39) et la longueur moyenne de la file d'attente (Figure 3- 40).

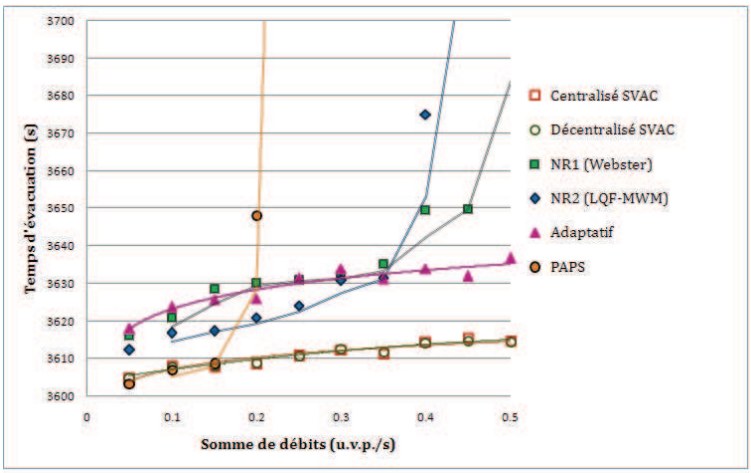


Figure 3- 37. Comparaisons des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches avec les débits non uniformes

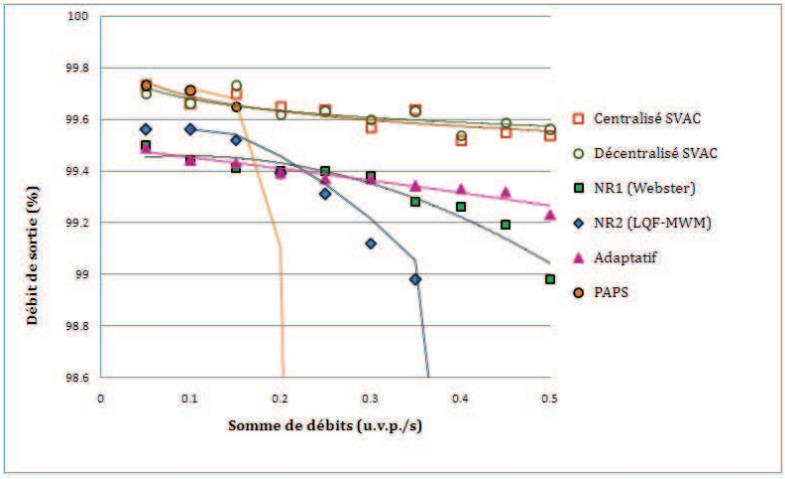


Figure 3- 38. Comparaisons des débits de sortie de véhicules entre les différentes approches avec les débits non uniformes

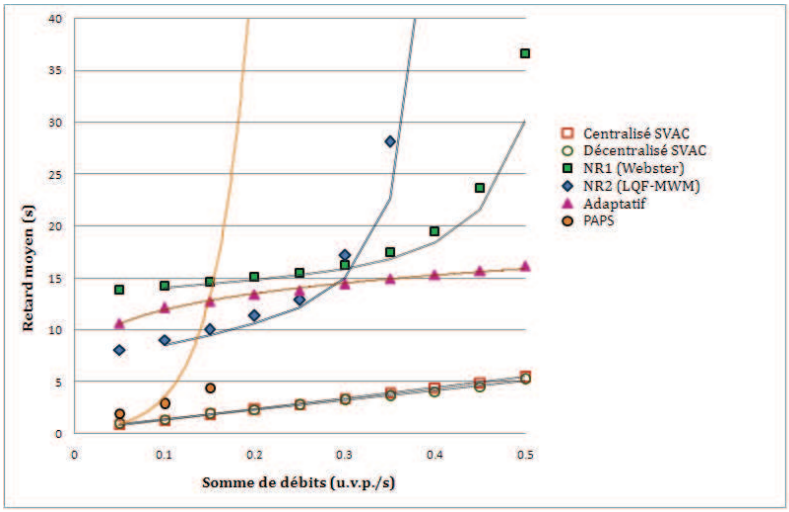


Figure 3- 39. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches avec les débits non uniformes

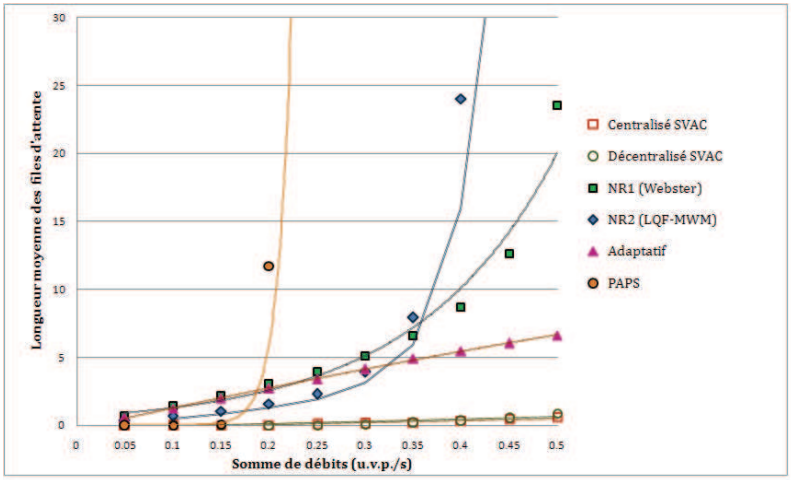


Figure 3- 40. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches avec les débits non uniformes

Les résultats montrent que :

- Les deux niveaux du système SVAC sont tout à fait comparables dans le cas où les débits ne sont pas uniformément distribués entre les rues;
- Plus le trafic est dense, meilleurs sont les systèmes SVAC vis-à-vis des autres régulateurs. Nous pouvons aussi constater que PAPS n'est en mesure de réguler que des débits très faibles.

3.5. Conclusion

Nous avons proposé, dans ce chapitre, des stratégies de contrôles pour une intersection plus complexe. Ce type d'intersection permet à des véhicules appartenant à des mouvements différents de traverser l'intersection en parallèle. Un nouveau modèle RdP est proposé pour modéliser et visualiser ces comportements. Ce modèle permet à plusieurs utilisateurs de partager parallèlement la ressource.

Pour le SVAC centralisé, ce nouveau modèle nous mène au problème d'optimisation. Même si l'algorithme de programmation dynamique trouve la solution optimale, la complexité en temps augmente d'une manière significative lorsque le nombre de véhicules à traiter devient important. Il ne répond pas aux exigences du temps réel. Cela nous a poussés à rechercher des méthodes heuristiques et meta-heuristiques. Une heuristique est proposée à la base d'analyse des propriétés du système. Un algorithme de colonies de fourmis a été proposé par l'analogie entre le problème de régulation et le problème du voyageur de commerce. Ainsi, trois approches de régulation centralisée ont été étudiées. Nous avons comparé les performances des trois approches. Les comparaisons montrent que l'heuristique est plus rapide et plus stable. Pour le régulateur SVAC décentralisé, nous avons simplifié le nouveau modèle RdP, par l'étude des différents scénarios. Cela nous a ramené à un modèle que nous avons vu dans le chapitre 2. A partir de ce modèle, le lemme 2-1 est applicable de la même manière que celle qui a été discuté dans le chapitre précédent. Pour ce faire, nous avons proposé un mapping des véhicules. Les résultats de simulation montrent que les performances du SVAC centralisé et du SVAC décentralisé sont quasiment similaires. Enfin, nous avons comparé le système SVAC avec les autres régulateurs. Les simulations nous montrent que notre système donne des résultats probants vis-à-vis des régulateurs émergents ou les plus utilisés. Ces résultats nous encouragent à appliquer le SVAC dans un environnement réaliste. Dans le chapitre suivant, nous introduisions quelques applications.

Chapitre 4 . APPLICATIONS

Introduction

Les simulations présentées dans les chapitres précédents ont montré que le SVAC est performant comparé aux autres systèmes de régulation tout en résistant face aux situations d'affluence. D'ailleurs, le régulateur décentralisé du SVAC est aussi efficace que le régulateur centralisé. Comme le régulateur décentralisé est mieux adapté au système temps réel étudié car il est moins gourmand en temps de calcul, nous retenons dans ce chapitre seulement le régulateur SVAC décentralisé pour évaluer son application à des situations plus proches de la réalité. Rappelons que dans les chapitres précédents, nous avons étudié et simulé seulement des intersections théoriques. Dans la mesure où l'application réelle du SVAC à une intersection s'avère coûteuse et irréalisable dans les conditions actuelles, dans ce chapitre nous tentons de reproduire les conditions réelles à travers la simulation et un prototype impliquant les robots. En ce qui concerne la simulation, nous allons appliquer le SVAC (décentralisé) à une T-intersection avec six voies situées à Belfort. Cette application est fournie avec des données réelles issues des boucles électromagnétiques. Elle vise à démontrer que le SVAC peut bien maîtriser la congestion observée dans les faits. Ensuite, nous réaliserons une maquette du SVAC à travers l'intersection de robots. Nous utiliserons la technologie NXT. Le but de cette maquette est de démontrer la faisabilité du SVAC face aux problèmes rencontrés dans la réalité.

Ce chapitre est organisé comme suit. Il vérifie d'abord les performances du SVAC dans une T-intersection. Ensuite, une maquette du SVAC est construite par des robots afin de démontrer la faisabilité du SVAC. A travers cette marquette, nous allons découvrir des phénomènes intéressants relatifs à l'application du SVAC.

4.1. Application SVAC à une T-intersection réelle

L'intersection étudiée est une T-intersection située entre le boulevard John Fitwgerald Kennedy, la rue de Belfort et le faubourg de Lyon, dans la ville de Belfort. L'intersection est présentée dans la Figure 4- 1. Ce type d'intersection apparaît souvent dans les réseaux du trafic réel. Les données sont recueillies par les boucles électromagnétiques qui sont noyés en amont de l'intersection. Nous observons qu'en heure de pointe du soir, lorsque les débits de chaque voie augmentent à un certain niveau, la circulation est saturée avec une accumulation de véhicules. En effet, cette intersection est un des nœuds centraux de Belfort, puisqu'il s'agit de la rencontre des routes qui desservent l'autoroute, le centre ville et les agglomérations Nord et Ouest de Belfort. Nous nous intéressons à l'étude des performances du système SVAC dans ce cas à travers une comparaison avec les trois régulateurs introduits dans les chapitres précédents: le régulateur adaptatif et les deux nouveaux régulateurs basés sur les technologies émergentes.

4.1.1. Configuration d'une T-intersection

La Figure 4- 2 schématise la structure géométrique de cette intersection. Cette intersection est constituée par la rencontre de trois rues où chaque rue offre deux voies aux courants qui la traversent. Les courants dominants incluent non seulement les courants directs, mais aussi les courants de tourne-à-gauche et de tourne-à-droite. Néanmoins, des voies dédiées aux mouvements de tourne-à-gauche et de tourne-à-droite sont proposées. Nous constatons qu'il y a trois paires de courants en conflit, à savoir trois courants provenant des voies V_1, V_5, V_6, la paire de courants provenant des voies V_2 et V_3 et trois courants provenant des voies V_3, V_4, V_5. Le cycle est alors actuellement découpé en trois phases (Figure 4- 2). En pratique, cette intersection est contrôlée par un régulateur à cycle fixe. La durée du cycle en heure de pointe est de 90 *s*.



Figure 4- 1. T-intersection entre le boulevard John Fitwgerald Kennedy, la rue de Belfort et le faubourg de Lyon, située à l'Ouest la ville de Belfort, France (Image provenant de http://maps.google.com)

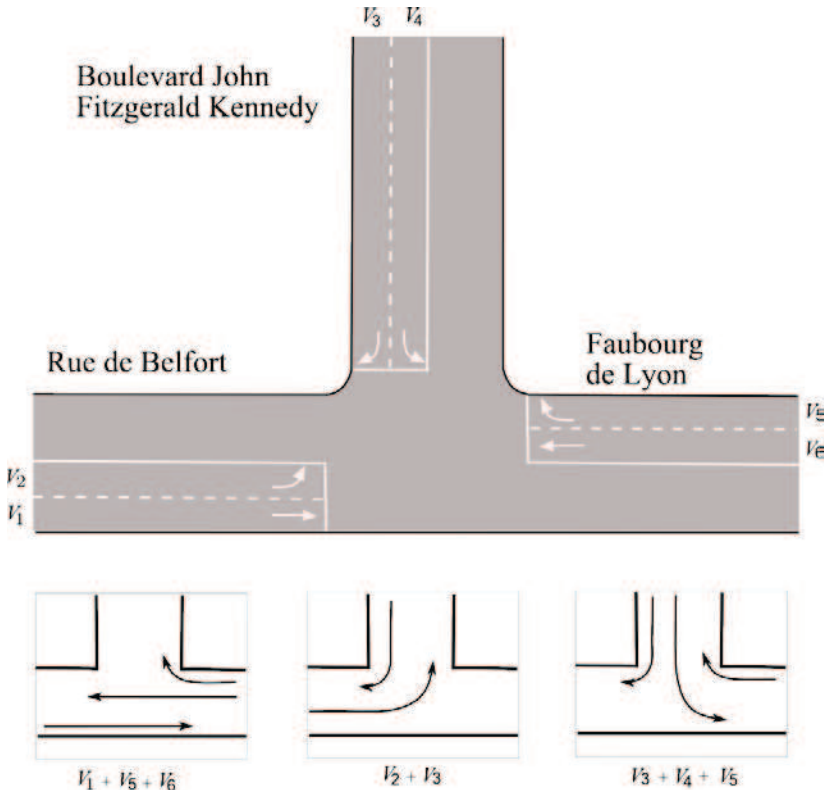


Figure 4- 2. Schéma d'une T-intersection et son découpage en phases

Pour réaliser le SVAC, nous supposons également que chaque voie est partagée en trois zones : la zone de stockage, la zone de conflit, et la zone de sortie. Les trois premiers marqueurs de position sont mis à 100 m de la zone de conflit afin de respecter la distance minimale avec les autres intersections voisines. Dans ce système, les technologies de communication sans-fil et de positionnement sont requises pour assurer la sécurité et distribuer les droits de passage aux véhicules.

Pour réaliser le SVAC décentralisé, chaque véhicule a besoin d'un dispositif de détection de l'espace inter-véhiculaire afin de décider s'il appartient à un peloton. En plus, les véhicules appartenant à des courants sans conflit sont reproduits dans la même rue à l'aide du « mapping » présenté dans le chapitre précédent. Si un véhicule détecte un véhicule qui le précède avec une distance inférieure à $v_{max} \times d$, il informe le véhicule précédent qu'ils appartiennent au même peloton. Ainsi, la valeur de d doit être définie par le système. Comme nous avons vu dans le chapitre 2, la borne inférieure de d est décidée par la formule (2.2). Nous avons ainsi limité la distance inter-véhiculaire maximale entre deux véhicules appartenant au même peloton à 30 m. L'algorithme de contrôle est le même que celui présenté dans le chapitre 3.

4.1.2. Étude de la performance de SVAC à une T-intersection

Les données des tests suivants sont fournies par le projet régional (Belfort, France) « Étude de Définition Pour la Desserte en transports Collectifs et l'Inter-modalité Autour de la future gare TGV de l'Aire Urbaine ». Les données recueillies montrent que la congestion du trafic a lieu pendant les heures de pointe du soir où les débits d'arrivée des voies sont proches des valeurs suivantes V_1 = 300 *u.v.p./h*, V_2 = 700 *u.v.p./h*, V_3 = 600 *u.v.p./h* , V_4 = 200 *u.v.p./h*, V_5 = 200 *u.v.p./h*, V_6 = 400 *u.v.p./h*. A ce moment-la, la somme des débits des voies critiques (V_2+V_6+V_4) arrive à 1300 *u.v.p./h.*

Nous réalisons les simulations dans l'environnement que nous avons introduit dans les chapitres précédents (Figure 4- 3). La loi de poursuite [Gipps 1981; Gipps 1986]est utilisée pour simuler le comportement des véhicules. Nous supposons une flotte homogène en utilisant les paramètres montrés dans le Tableau 2-3.

Les performances du SVAC sont comparées aux trois régulateurs : le régulateur adaptatif et les deux nouveaux régulateurs basés sur la communication sans-fil et la technologie de positionnement, à savoir NR1 basé sur la formule Webster et NR2 basé sur l'algorithme LQF-MWM. Il faut noter que nous restreignons la durée de cycle de NR1, inférieure à 120 s. Parce qu'en réalité, même s'il peut être nécessaire d'utiliser des cycles plus longs, lorsque la demande du trafic est très élevée, la durée du cycle doit être maintenue en dessous de 120 s. Sinon, elle entraînera un retard excessif [Garber et Hoel 1997].

Nous comparons d'abord les performances des régulateurs ci-dessus pendant les heures de pointe du soir, à savoir les débits d'arrivée des voie V_1,V_2,V_3,V_4,V_5,V_6 sont proches de: 300, 700, 600, 200, 200 et 400 *u.v.p./h*. Dix scénarios successifs ont été simulés. Le Tableau 4- 1 nous donne le nombre moyens de véhicules sortis après une heure suite à l'application de chaque régulateur. Les résultats disqualifient le régulateur NR2. Ils montrent que les autres régulateurs permettent de résorber le trafic avec un léger avantage constaté pour le SVAC qui accumule moins de véhicules. En effet, les autres régulateurs accumulent plus d'une vingtaine de véhicules tandis que le SVAC, n'accumule pas au delà de 9 véhicules.

Tableau 4- 1.Comparaisons de débit de sorite (*u.v.p*)

	NR1 (Webster)	NR2(LQF-MWM)	Adaptatif	SVAC
Arrivée de véhicules	2400	2400	2400	2400
Sortie de véhicules	2371,6	2155,4	2362,4	2388,2

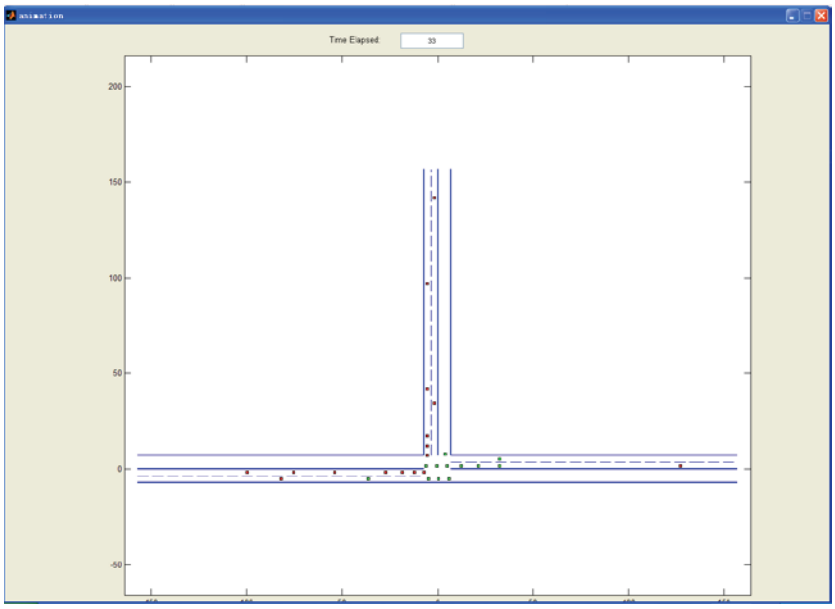


Figure 4- 3. Capture d'écran pendant la simulation du système SVAC (chaque rectangle représente un véhicule ; la couleur de rectangle signifie si un véhicule obtient une clé : vert - clé ; rouge-sans clé)

Dans tous les cas les trois régulateurs, à savoir NR1, adaptatif et SVAC, permettent de résorber ce niveau du trafic. Il est donc intéressant de les comparer lorsque la demande du trafic est plus élevée. Ainsi, nous avons simulé un trafic plus dense où la somme des débits des voies critiques (V_2+V_6+V_4) varie de 1300 *u.v.p./h* à 1800 *u.v.p./h*. La Figure 4- 4 et la Figure 4- 5 nous présentent les résultats de simulation. L'axe horizontal représente la somme des débits des voies critiques, de 0,35 *u.v.p./s* à 0,5 *u.v.p./s*. Chaque valeur dans les figures représente une moyenne de dix simulations indépendantes, où chaque simulation fonctionne une heure. Plus précisément, nous avons repris les données issues des boucles électromagnétiques des entrées de véhicules, en leur injectant des véhicules supplémentaires. D'après les résultats de la simulation, nous pouvons voir que le régulateur SVAC présente de grands avantages pour améliorer la fluidité du trafic. Les performances du régulateur NR1 et du régulateur adaptatif sont similaires. D'après la définition du niveau de service[24] (en anglais : Level of Service)donné dans [TRB 2000], le système SVAC fournit un niveau de service «B», même pour une demande de trafic élevée. Le régulateur NR1 et le régulateur adaptatif fournissent le niveau «D».

[24] Niveau de service est une mesure utilisé par les ingénieurs du trafic afin de déterminer l'efficacité des éléments de l'infrastructure de transport: Il est le plus couramment utilisé pour analyser les autoroutes, mais le concept a aussi été appliqué aux intersections, de transit et d'approvisionnement en eau. Le niveau de service à intersection est mesuré par le retard moyen par véhicule pendant une période déterminée (par exemple, les heures de pointes). Tableau 4- 2 donne les critères pour définir le niveau de service.

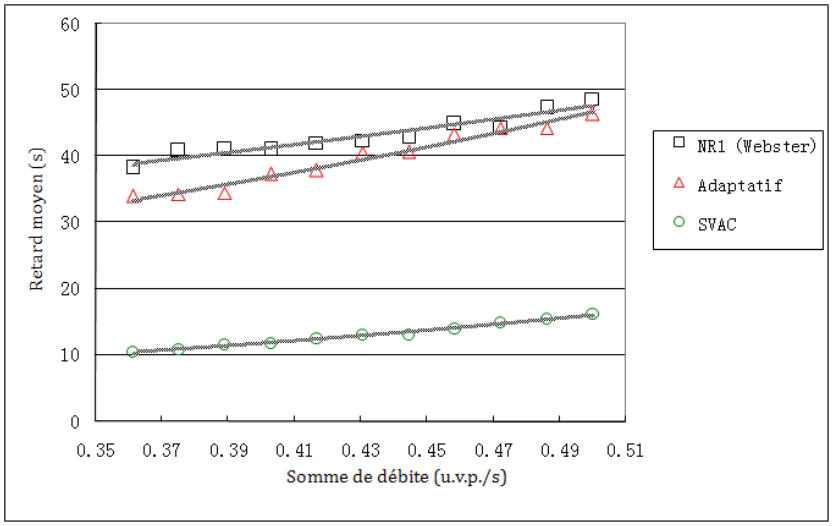


Figure 4- 4. Retard moyen

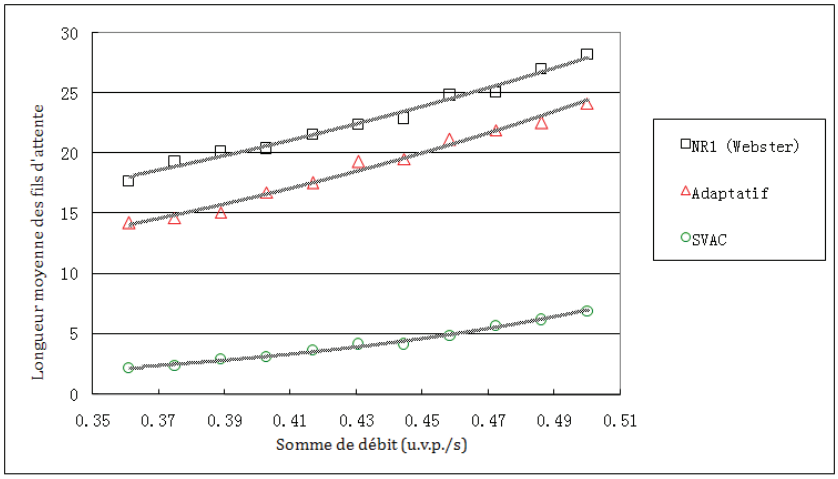


Figure 4- 5. Longueur moyenne des files d'attente

Tableau 4- 2. Niveau de service pour une intersection à feux

Niveau de service	Retard moyen par véhicule dans une intersection à feux	Description
A	≤ 10 *seconds*	Débit libre (Free flow)
B	10-20 *s*	Débit raisonnablement libre (Reasonably free flow)
C	20-35 *s*	Débit stable (Stable flow)
D	35-55 *s*	Débit approché instable (Approaching unstable flow)
E	55-80 *s*	Débit instable (Unstable flow)
F	≥ 80 *s*	Débit gêné (Forced or breakdown flow)

De la simulation ci-dessus, on peut conclure que le SVAC arrive à bien maîtriser le trafic comparativement aux régulateurs connus ou émergents. Les résultats nous encouragent à réaliser le système en pratique. Cependant, en raison de contraintes économiques, nous sommes incapables de mettre en pratique ce système dans une intersection réelle pour l'instant. Hormis ce fait, le succès de la réalisation du SVAC dépend de sa capacité à résister aux perturbations des situations réelles, tels que les temps de communication, les messages perdus, et ainsi de suite. Ainsi, pour des raisons de sécurité, une intersection sans feux ou sans signalisation latérale nécessite au moins une validation du système par une maquette.

4.2. Maquette du SVAC à une échelle réduite

Une maquette du SVAC décentralisé est construite par des robots LEGO NXT [Abbas-Turki, Gao et al. 2011]. Cette maquette est utilisée pour démontrer la faisabilité du SVAC même s'il existe des perturbations dans la communication sans-fil, par exemple, l'absence des messages prévues pour véhicules ou le régulateur. Elle permet aussi de vérifier les hypothèses de simulation.

4.2.1. Configuration de la maquette

La maquette reproduit le SVAC décentralisé appliqué à une intersection élémentaire (Figure 2-1). La configuration de la maquette est montrée dans la Figure 4- 6. Toutes les rues sont représentées en couleur blanche. Le marqueur de position est un rectangle de couleur. Deux couleurs sont utilisées pour distinguer les deux rues. Chaque véhicule possède un capteur couleur pour identifier la zone dans laquelle il se positionne (Figure 4- 8). Les marqueurs de position permettent aussi de corriger la distance calculée par l'odomètre du véhicule. Les véhicules communiquent via la liaison Bluetooth. Nous remarquons qu'il y a un régulateur dans cette maquette. Théoriquement, il ne doit pas calculer la séquence de passage des véhicules. Il doit seulement envoyer la clé au véhicule qui est en charge de distribuer les clés aux autres. Quant aux véhicules, dès qu'ils passent sur le premier marqueur de position, ils envoient la requête du droit de passage au régulateur.

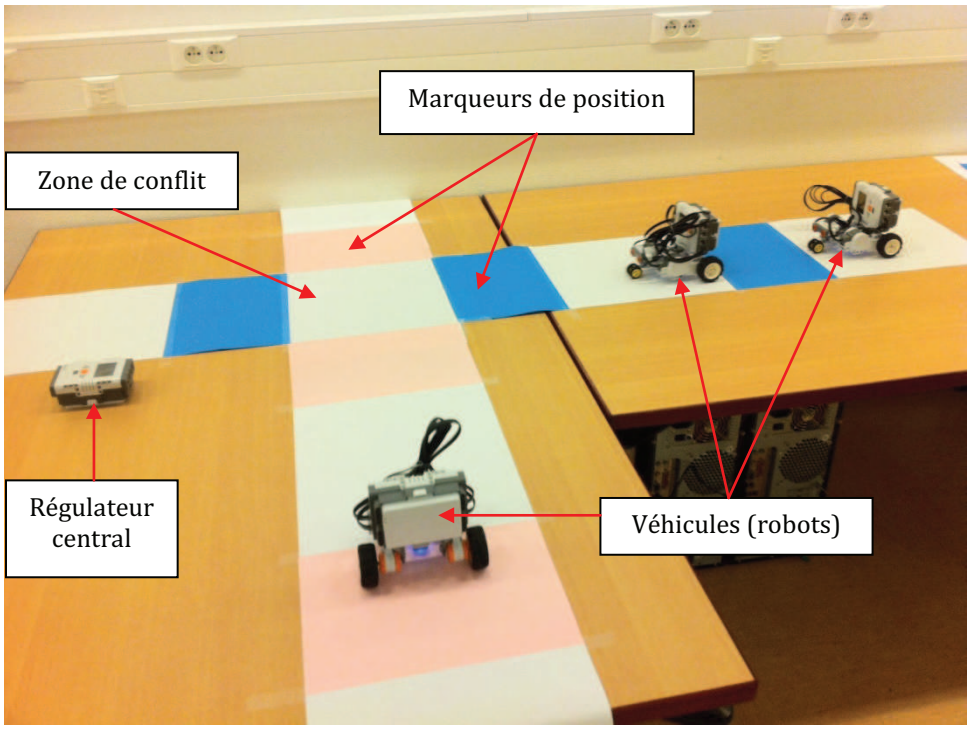


Figure 4- 6. Vue globale de la maquette

Véhicule

Le véhicule utilisé dans cette maquette est un robot LEGO NXT. Les principales technologies embarquées dans chaque robot comprennent : un NXT micro-processeur, un capteur ultrason, deux servomoteurs couplés à des capteurs de rotation et un capteur couleur, tels que montrés dans les Figure 4- 7 et Figure 4- 8. Le programme relatif au mouvement des robots est implémenté dans chaque NXT micro-processeur. Un capteur ultrason à l'avant du véhicule

détecte la présence d'un véhicule devant et la distance qui sépare les deux véhicules. Chaque véhicule adapte sa vitesse si la distance inter-véhiculaire est inférieure à 40 centimètres pour éviter la collision avec le véhicule précédent sur la même rue. Sous cette condition, un véhicule se considère comme un suiveur du véhicule précédant et adapte sa vitesse. Afin d'identifier l'entrée à chaque zone, un capteur couleur est embarqué en dessous du véhicule et détecte la couleur au sol. Tout le matériel est détaillé dans la partie A.6.

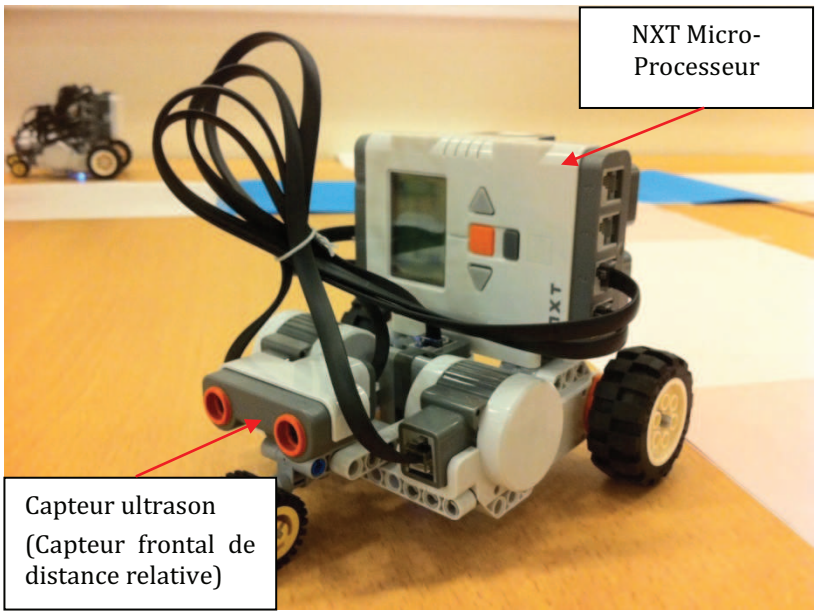


Figure 4- 7. Vue de devant du véhicule

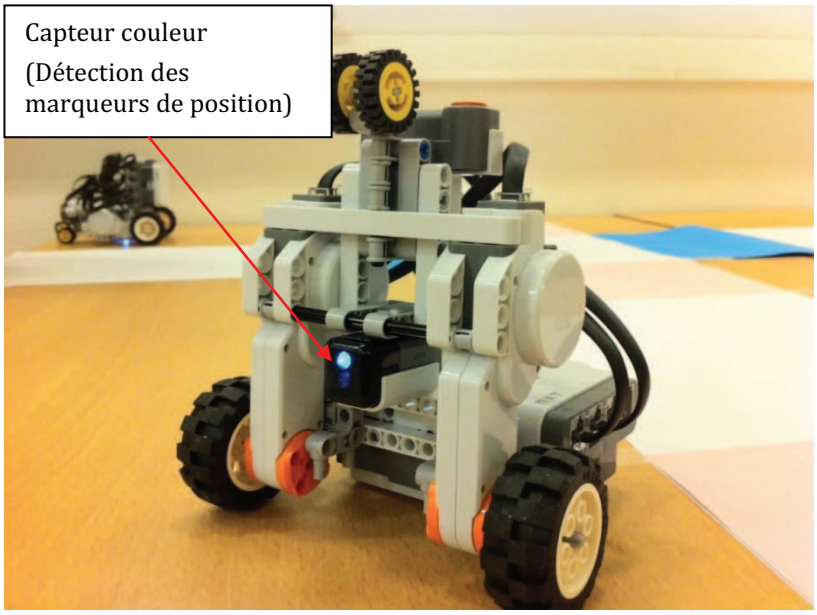


Figure 4- 8. Vue de dessous du véhicule

Régulateur

Le programme du régulateur est implémenté dans un NXT micro-processeur (Figure 4- 9) qui représente l'intersection. Le régulateur surveille la distribution des droits de passage. Il reçoit les informations envoyées par les véhicules, et attribue les autorisations de passage selon l'algorithme développé. L'écran LCD du régulateur permet d'afficher les informations clés de l'intersection, ce qui nous permet de superviser le bon déroulement de l'algorithme.



Figure 4- 9. Vue du régulateur

Communication sans-fil

Un système NXT Bluetooth est conçu pour permettre la communication sans-fil sous une configuration maître/esclave. En d'autres termes, tous les NXT micro-processeurs ne peuvent communiquer que sous une architecture centralisée. Ainsi, chaque véhicule (robot) ne peut pas communiquer directement avec les autres véhicules. Le régulateur est choisi pour être le maître du réseau de la communication sans-fil. Il supporte toutes les communications entre chaque paire de véhicules (Voir Figure 4- 10). En outre, le régulateur ne peut communiquer qu'avec un seul véhicule à la fois. Par exemple, si le régulateur est en train de communiquer avec un véhicule *i*, il doit finir d'envoyer/de recevoir des données au/du véhicule *i* avant de communiquer avec un autre véhicule.

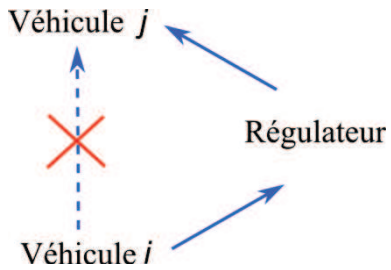


Figure 4- 10. Communication entre deux véhicules

Le régulateur peut communiquer avec au plus trois véhicules en raison des limitations matérielles de la technologie NXT. Par conséquent, il ne peut pas contrôler l'intersection avec plus de trois véhicules. Cela nous empêche d'enquêter profondément sur l'efficacité du trafic. Néanmoins, cette maquette met en lumière certains phénomènes intéressants visibles et mesurables.

Performance du NXT Bluetooth

Deux paramètres sont testés: le taux des messages envoyé avec succès et le retard moyen de la communication. Chaque test commence par la synchronisation de l'horloge des quatre NXT micro-processeurs, grâce à l'utilisation de capteurs tactiles (voir la Figure 4- 11). Un message est

composé de quatre chiffres envoyés périodiquement des trois véhicules au régulateur ainsi que du régulateur aux trois véhicules. Les quatre chiffres indiquent le temps et l'origine du message. Le test dure 90 *s* au cours desquelles chaque NXT micro-processeur enregistre les messages envoyés et reçus. Ensuite, les messages enregistrés sont comparés afin d'évaluer le taux des messages envoyés avec succès et le retard moyen de la communication. Chaque NXT micro-processeur envoie un seul message à chaque cycle. Le cycle varie de 50 *ms* à 900 *ms*. Vingt combinaisons du temps de cycle sont testées et chaque combinaison est testée dix fois. Le Tableau 4-3 et la Figure 4-12 présentent les résultats obtenues de la combinaison optimale. D'après la comparaison de tous les tests, les résultats optimaux sont obtenus lorsque les véhicules envoient un message tous les 150 *ms* et le régulateur envoie un message tous les 90 *ms*.



Figure 4- 11. Quatre capteurs tactile relies respectivement à chaque NXT Micro-Processeur

Tableau 4- 3. Statistiques globales: le cycle de véhicule 150 *ms* et le cycle du régulateur 90 *ms*

		Régulateur aux véhicules	Véhicules au régulateur
Etat des messages	**Tentatives d'envoi**	991	1806
	Envois avec succès	290	138
	Taux	29,26%	7,64%
Délai de communication	**Moyenne**	230,80 *ms*	785,12 *ms*
	Minimum	31 *ms*	674 *ms*
	Maximum	402 *ms*	1097 *ms*
	Ecart-type	93,07 *ms*	74,99 *ms*
Intervalle des messages avec succès	**Moyenne**	918,88 ms	1945,56 *ms*
	Minimum	272 *ms*	750 *ms*
	Maximum	6825 *ms*	7350 *ms*
	Ecart-type	752,44 *ms*	1313,81 *ms*

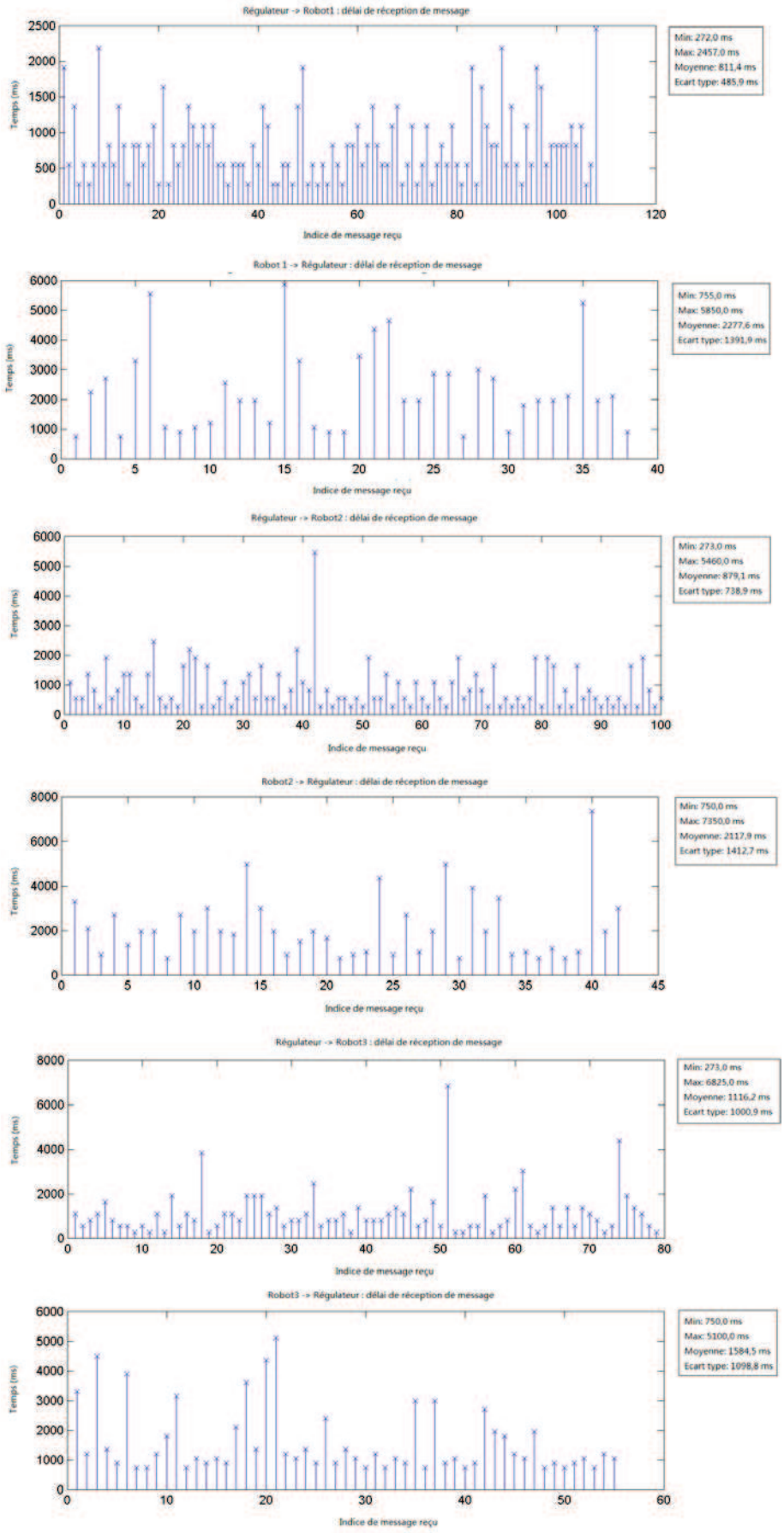


Figure 4- 12. Communication entre trois robots (véhicules) et le régulateur dans 90 *s*

Nous pouvons noter que le taux des messages envoyés avec succès du véhicule est très faible et que le temps de communication est relativement élevé. Les faibles performances du NXT Bluetooth nous ramène à réfléchir sur la faisabilité du système. Est-ce qu'il est adaptable à ces faibles performances de la communication sans-fil ?

4.2.2.Tests de la maquette

De nombreux tests de cette maquette ont été réalisés (Figure 4- 13). Chaque test dure au plus 30 *s*. Nous avons comparé le SVAC avec un système qui adopte la stratégie de contrôle PAPS (Premier Arrivé, Premier Servi). Chaque système a été testé 200 fois. Les véhicules sont placés au hasard au début de chaque test.

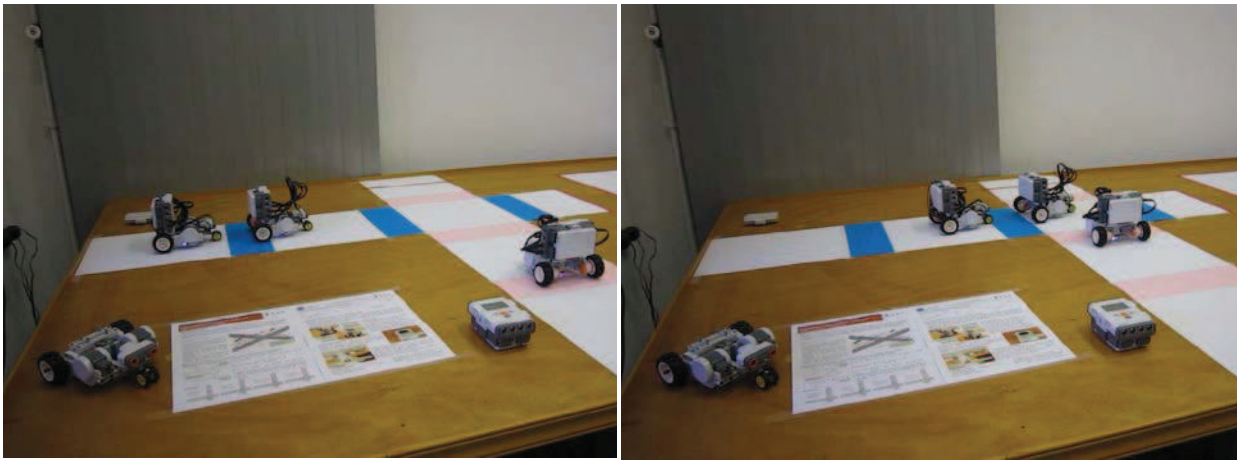


Figure 4- 13. Capture d'écran des tests

Sécurité de la zone de conflit

Nous n'avons observé aucune collision dans tous les tests même si la communication est peu fiable car le système d'échange de message proposé peut bien garantir la sécurité. D'une part, dans ce système, chaque véhicule ne peut pas accéder à la zone de conflit sans clé. S'il existe des perturbations dans la communication entre un véhicule et le régulateur, le véhicule ne peut pas obtenir la clé et il va s'arrêter avant la zone de conflit. Ainsi, il n'y a pas de risque de collision. D'autre part, la clé est préalablement destinée au véhicule sans limitations particulières du temps de validité. Chaque véhicule se déplace en fonction de la signalisation à bord. Il n'a pas besoin d'estimer s'il peut arriver à la zone de conflit avant une date prédéfinie. En conséquence, il s'agit d'une intersection sans zone de dilemme [A. Klein, K.Mills et al. 2006]. La sécurité dans la zone de conflit est ainsi garantie.

De surcroît, la technologie de positionnement peut réduire le risque de collision. Si un véhicule tombe en panne dans la zone de conflit, les observations au niveau des marqueurs de position 2 et 3 permettent de garder la zone de conflit réservé. Ainsi, le régulateur ne libère pas les véhicules des mouvements en conflit. Néanmoins, le risque de collision persiste si les véhicules (robots) ne détectent pas les marqueurs de position. Dans ce cas-ci, nous pouvons également concevoir un système de positionnement supplémentaire. Cependant, la taille de la maquette ne nous permet pas d'explorer profondément ce problème.

En résumé, ces tests ont démontré que le système résiste aux faibles performances de la communication sans-fil.

Efficacité du contrôle

Nous avons réalisé la comparaison entre la stratégie de contrôle du SVAC et la stratégie de contrôle PAPS à travers plusieurs scénarios. Nous avons relevé les mêmes constatations. Nous donnons ici l'exemple suivant : La vitesse maximale de chaque véhicule est limitée à 0,064 m/s et la longueur de l'intersection est de 0,64 m. Sans système de signalisation, le temps de parcours pour chaque véhicule est de 10 s. Les tests ont révélé que le temps d'évacuation peut être réduit de 5 s par le SVAC. Néanmoins, comme mentionné précédemment, trois véhicules ne sont pas suffisants pour traiter sérieusement du problème d'efficacité.

Situation de blocage

Nous avons rencontré une seule situation de blocage au cours des tests (plus de 400 tests). La situation de blocage apparaît lorsque l'ordre des demandes reçues du régulateur est différent de l'ordre des arrivées des véhicules. Ce faible nombre de situation de blocage est probablement dû au protocole de communication du NXT Bluetooth qui ordonne la réception des messages.

Voici un exemple de situation de blocage (voir Figure 4- 14) : le véhicule 1 arrive avant le véhicule 2. Les deux véhicules se déplacent sur la même rue. En raison de perte de messages, le véhicule 1 ne reçoit pas la clé et s'arrête avant la zone de conflit. Cependant, le véhicule 2 reçoit sa clé. Comme le dépassement est interdit dans une voie, le véhicule 2 ne peut pas traverser la zone de conflit jusqu'au moment où le véhicule 1 traverse la zone de conflit. Par ailleurs, les véhicules dans la rue perpendiculaire ne peuvent pas obtenir une clé sauf après que le véhicule 2 passe sur le troisième marqueur de position.

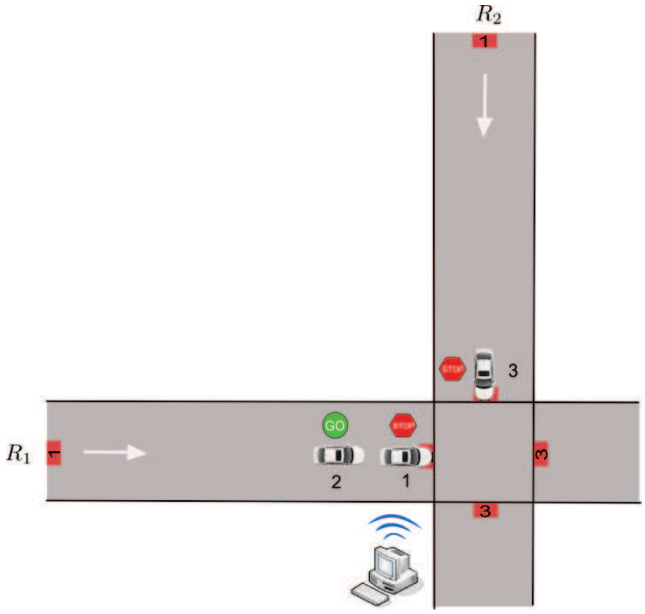


Figure 4- 14. Situation de blocage

La solution pour résoudre cette situation de blocage consiste à utiliser l'information sur le temps de passage des véhicules au niveau des premiers marqueurs de position. Si un véhicule avec une clé est arrêté, il en informe le régulateur. Le régulateur distribue la clé à tous les véhicules qui partagent la même rue avec le véhicule bloqué (Voir Figure 4- 15). Pour vérifier cette solution, nous avons simulé des situations de blocage manuellement. Tous les blocages sont détectés et résolus avec succès.

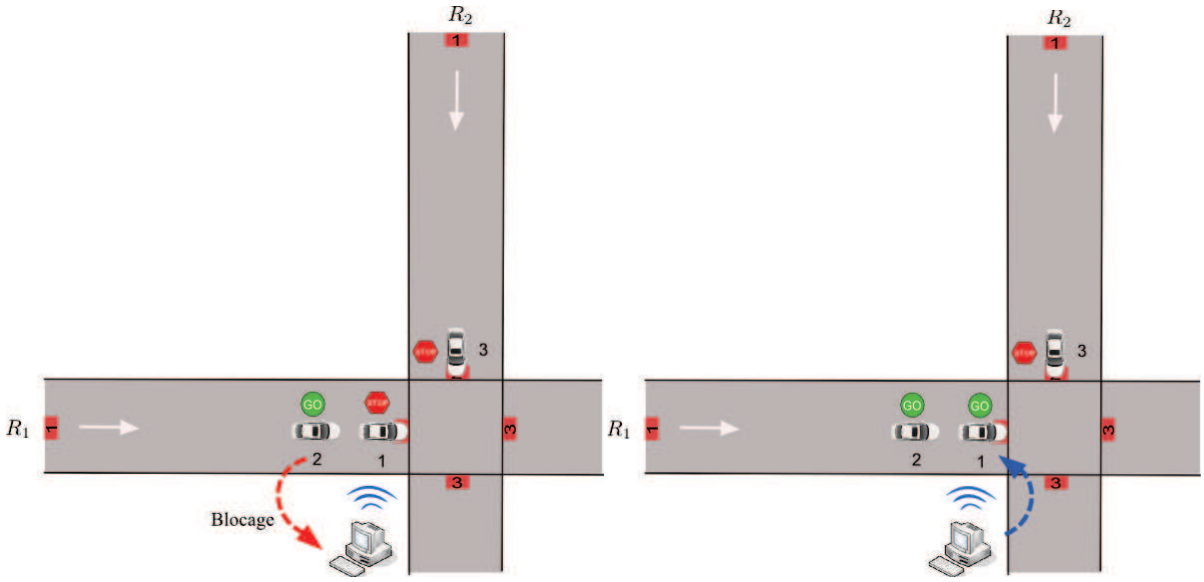


Figure 4- 15. Dégager d'une situation de blocage

La maquette présentée ici a montré la faisabilité du SVAC. Même si les performances de la communication NXT Bluetooth sont faibles, ce système peut garantir la sécurité dans la zone de conflit. D'ailleurs, les tests soulèvent une situation éventuelle de blocage. Une solution est proposée pour résoudre ce problème. Cette maquette montre que le système pourraient être déployés pour des applications industrielles, à condition de renforcer le système de positionnement. Cette maquette nous encourage aussi à déployer le système pour des véhicules ordinaires, à l'aide de la signalisation à bord. Cependant, cette maquette soulève la nécessité d'étudier soigneusement les problèmes relatifs aux technologies utilisées, à savoir le positionnement et la communication sans-fil, avant tout déploiement.

4.3. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons abordé les confrontations du SVAC aux situations réelles. D'abord, en exploitant les données des boucles électromagnétiques pour vérifier les performances du SVAC dans une T-intersection. Les résultats de simulation nous montrent que le SVAC arrive à bien maîtriser le trafic même si la demande du trafic est élevée. Ensuite, nous avons réalisé ce système à une échelle réduite. Les robots LEGO NXT sont utilisés pour simuler les véhicules. Cette maquette fonctionne correctement et montre la faisabilité du système. Bien que cette maquette ait mis en évidence le problème de blocage et la nécessité d'avoir un système de positionnement robuste, elle nous encourage à mettre en pratique le système pour des véhicules ordinaires ou autonomes.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous avons proposé un nouveau système de régulation au sein des intersections : système du véhicule-actionneur coopératif (SVAC). Ce système est basé sur les technologies de la communication sans-fil et du positionnement. Ainsi, la régulation est plus précise et est liée à l'état de chaque véhicule et à l'état de l'intersection.

Nous avons d'abord passé en revue les éléments de base composant la régulation du trafic aux intersections. Puis nous avons présenté les technologies de communication sans-fil et de positionnement et leurs applications. Nous avons décrit quelques méthodes émergentes basées sur ces nouvelles technologies. Bien que ces approches supposent une amélioration de la fluidité du trafic à certains égards, elles présentent des limites. Cela nous a poussé à chercher un nouveau système.

Notre réflexion nous a amené à proposer un système de contrôle qui décide de manière explicite la séquence de passage des véhicules. Ainsi, chaque véhicule est traité individuellement. Il est informé de son autorisation de traverser l'intersection par la signalisation à bord en fonction de sa propre progression. Les avantages de ce système sont évidents. Il maximise l'utilisation des ressources de l'intersection en organisant rationnellement la séquence de passage. De plus, ce système pourrait contribuer à une meilleure sécurité grâce à la signalisation à bord.

Pour pouvoir développer des stratégies de régulation génériques et efficaces, nous avons décrit le comportement du système. Plus précisément, nous avons utilisé un modèle réseaux de Petri (RdP) qui s'adapte au problème de régulation. D'une part, il prend en compte les véhicules d'une manière individuelle; et d'autre part, il est capable de décrire le comportement d'une large majorité des problèmes de ressources partagées.

En considérant l'intersection comme une ressource partagée par les véhicules, le modèle RdP nous ramène à un problème d'optimisation combinatoire. Ce problème consiste à déterminer l'ordre de passage des véhicules en fonction de leurs dates d'arrivée théoriques calculées à partir des contraintes temporelles. L'objectif est d'évacuer les véhicules le plus tôt possible. La résolution de ce problème nous donne une approche de régulation centralisée.

L'analyse du modèle RdP nous propose une autre approche de régulation. Celle-ci est décentralisée. L'objectif de cette approche vise à minimiser instantanément la longueur de la file d'attente. Ainsi deux approches avec deux objectifs et protocoles différents sont proposées pour le SVAC. Les simulations montrent que les performances des deux approches sont comparables et que le SVAC donne de meilleurs résultats que les autres méthodes de la littérature.

Dans l'objectif de généraliser notre système, nous l'avons appliqué à une intersection plus complexe. Le modèle RdP est enrichi, ce qui permet à plusieurs utilisateurs de partager parallèlement la ressource sans conflit. Cependant, ce type d'intersection met en évidence le problème de la complexité algorithmique. Ainsi, l'approche centralisée ne répond plus aux exigences du temps réel. Ceci nous a poussé à rechercher dans les méthodes heuristiques et meta-heuristiques. Une heuristique est proposée grâce à l'analyse des propriétés du problème. L'algorithme de colonies de fourmis est appliqué en établissant une analogie entre le problème traité et le problème du voyageur de commerce. Les comparaisons de la qualité des algorithmes proposés montrent que l'heuristique est plus rapide et plus stable.

Pour l'approche décentralisée, nous avons étudié la possibilité de profiter des résultats obtenus en analysant quatre scénarios différents. Les résultats s'avèrent adaptées. Les simulations démontrent que notre système dégage des performances intéressantes comparativement aux différentes approches de régulations. Ces simulations soulignent aussi un léger avantage pour

l'approche décentralisée par rapport à l'approche centralisée. Ces bons résultats nous ont incités à mettre en pratique le système. Une maquette du système basée sur les robots NXT a été développée pour discuter de la faisabilité du système. Cette maquette a permis de valider l'approche face aux conditions réalistes de la communication sans-fil. Elle a soulevé quelques problèmes qui ont été résolus. Nous avons relevé que le SVAC est robuste face faux problèmes de la communication sans-fil. Néanmoins, il faut approfondir les questions relatives au positionnement.

Notre travail a permis d'explorer un nouveau domaine de recherche, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique : Sur le plan théorique, nous avons proposé un nouveau modèle de régulation du trafic et des stratégies appropriées de contrôle. Du point de vue pratique, nous avons proposé une nouvelle vision du trafic qui permet d'améliorer les systèmes de gestion et de régulation actuellement en place, tout en anticipant sur les systèmes à venir, à travers le déploiement des nouvelles technologies de communication sans-fil et de positionnement.

Nous envisageons quelques perspectives afin de renforcer la recherche dans ce domaine:

1- Afin de ramener le système à la réalité du trafic, nous prévoyons de prendre en considération l'hétérogénéité du trafic avec la cohabitation de plusieurs types de mobiles : certains non équipés et d'autres équipés avec des niveaux de priorité différents. Ceci, sans oublier de prendre en compte les traversées piétonnes qui peuvent être intégrées selon le « Pedestrian scramble » (En arrêtant tous les véhicules pendant un temps dédié exclusivement aux piétons avec dans ce cas, la possibilité supplémentaire de traverser en diagonale) en exploitant le surplus de capacité offert par le nouveau système de régulation ;

2- D'un point de vue théorique, la modélisation par les RdP nous encourage à étudier les réseaux d'intersection en s'intéressant aux espaces de stockage disponibles entre les différentes intersections. A la lumière des résultats obtenus, chaque intersection peut être considérée comme étant une vanne qui s'ouvre et qui se referme pour former des pelotons de véhicules qui traverseront la ville sans quasiment s'arrêter.

BIBLIOGRAPHIE

A. Klein, L., M. K.Mills, et al. (2006). Traffic Detector Handbook, U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration.

A. Wolsey, L. et G. L. Nemhause (1999). Integer and Combinatorial Optimization, Wiley-Interscience.

Abbas-Turki, A., F. Gao, J. WU et al. (2011). Using Robots for Prototyping Autonomous Intersection Management. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 11). Washington D.C., USA, soumis.

ADAMS, W. F. (1936). "Road traffic considered as a random series." Journal of the ICE 4(1): 121-130.

Aditya, V. T., D. V. K. Viswanath, et al. (2009). A mixed autonomy coordination methodology for multi-robotic traffic control. Robotics and Biomimetics, 2008. ROBIO 2008. IEEE International Conference on.

Akçelik, R. (1995). Signal Timing Analysis for Vehicle Actuated Control. Working Paper WD TE95/007. Vermont South, Australia, ARRB Transport Research Ltd.

Allaire, G. (2007). Numerical analysis and optimization: an introduction to mathematical modelling and numerical simulation, Oxford University Press.

Amditis, A. (2010). Cooperative systems and safety: from the point of view of the driver. Cooperative Mobility Showcase 2010. Amsterdam.

Amditis, A., E. Bertolazzi, et al. (2009). "A Holistic Approach to the Integration of Safety Applications: The INSAFES Subproject Within the European Framework Programme 6 Integrating Project PReVENT." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 11(3): 554 - 566.

AmericaITS (1997). Proceedings of the Intelligent Vehicles Initiative Human Factors Workshop, Washington DC: ITS America.

Anonyme (1991). Régulation du trafic routier, feux de circulation, terminologie, Association Française de NORmalisation (AFNOR).

Anonyme (2002). "GETRAM/AIMSUN version 4.1 User's Manuals." Transport Simulation Systems (TSS).

Anonyme (2004). "chapitre « Décret numéro 2004-998, article 1 », code de la Route (partie réglementaire), article R110-2." Journal Officiel.

Aotani, T., S. Yamaoka, et al. (2002). Research & development of driving safety support systems. SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference.

Arora, S. et B. Barak (2009). Computational Complexity: A Modern Approach, Cambridge University Press.

Avner, S., F. Boillot, et al. (2000). "L'image au service de la gestion du trafic urbain." T.E.C. 160: 9-13.

Aw, A. et M. Rascle (2000). "Resurrection of « second order » models of traffic flow?" SIAM Journal on Applied Mathematics 60(3): 916-938.

B. Powel, W. (2007). Approximate Dynamic Programming: Solving the Curses of Dimensionality Wiley-Interscience.

Baccelli, F., G. Cohen, et al. (1992). Synchronization and Linearity : An Algebra for Discrete Event Systems, Wiley.

Baras, J., W. Levine, et al. (1979). "Discrete-time point processes in urban traffic queue estimation." Automatic Control, IEEE Transactions on 24(1): 12-27.

Barbeau, C. et M. Fève (2002). Instruction interministérielle sur la signalisation routière, Ministère de l'intérieur et Ministère de l'équipement, du logement, des transports et de l'espace, chapitre « 6ème partie : feux de circulation permanents ».

Barceló, J. et J.Casas (2002). Dynamic Network Simulation with AIMSUN International Symposium on Transport Simulation, Yokohama, August, 2002.

Barney, G. C. (2003). Elevator traffic handbook : theory and practice, Taylor & Francis.

Batz, T., K. Watson, et al. (2009). Recognition of dangerous situations within a cooperative group of vehicles. Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE.
Bellman, R. (2003). Dynamic Programming. Mineola, New York, Dover Publications, INC.
Bielefeldt, C., H. Condie, et al. (2002). Be smart: SMART NETS and TUC, Traffic Technol. Int.**:** 40-43.
Biham, O., A. A. Middleton, et al. (1992). "Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models." Physical Review A 46(10): R6124.
Bloomfield, R. (2006). Fundamentals of European rail traffic management system (ERTMS). Railway Signalling and Control Systems, 2006. The 11th IET Professional Development Course on.
Blum, J. J., A. Eskandarian, et al. (2004). "Challenges of intervehicle ad hoc networks." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 5(4): 347-351.
Boillot, F., J. M. Blosseville, et al. (1992). Optimal signal control of urban traffic networks. Road Traffic Monitoring, 1992 (IEE Conf. Pub. 355).
Boillot, F., S. Midenet, et al. (2006). "The real-time urban traffic control system CRONOS: Algorithm and experiments." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 14(1): 18-38.
Boillot, F., S. Midenet, et al. (2000). Real-life CRONOS evaluation. Road Transport Information and Control, 2000. Tenth International Conference on (Conf. Publ. No. 472).
Bouet, M. et A. L. dos Santos (2008). RFID tags: Positioning principles and localization techniques. Wireless Days, 2008. WD '08. 1st IFIP.
Bouraoui, L., S. Petti, et al. (2006). Cybercar Cooperation for Safe Intersections. Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE.
Bouyekhf, R., A. Abbas-Turki, et al. (2003). Fluid stochastic Petri net for control of an isolated two-phase intersection. IEEE Multiconf. on Computational Engineering in Systems Applications. Lille, France.
Braban, C. et F. Boillot (2003). Les systèmes adaptatifs de régulation du trafic en milieu urbain, synthèse, Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS). 44.
Brackstone, M. et M. McDonald (1999). "Car-following: a historical review." Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour **2**(4): 181-196.
Brakemeier, A. (2010). Toward continuous communication for cooperative systems Company. Cooperative Mobility Showcase 2010. Amsterdam.
Bretherton, R. D. et G. T. Bowen (1990). Recent enhancements to SCOOT-SCOOT Version 2.4. Road Traffic Control, 1990., Third International Conference on.
Brignolo, R., G. Vivo, et al. (2008). Use cases, functional specifications and safety margin applications for the SAFESPOT project.
Brookes, D. et M. G. Bell (1991). Expected Delays and Stop Calculation for Discrete Adaptive Traffic Signal Control. First International Symposium on Highway Capacity, Karlsruhe, Germany, U. Brannolte, Ed.
Brucker, P. (2007). Scheduling Algorithms, Springer.
Buisson, C., J.-P. Lebacque, et al. (1995). Macroscopic modelling of traffic flow and assignment in mixed networks. The International Society for Computing in Civil and Building Engineering (ISCCBE), , Rotherdam,UK.
Burke, E. K. et G. Kendall (2005). Search Methodologies : Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques, Springer.
C. Dunne, M., R. W. Rothery, et al. (1968). "A Discrete Markov Model of Vehicular Traffic." Transportation Science 2(3): 233-251.
Cascetta, E. (2001). Transportation systems engineering: theory and methods, Springer.
Chakroborty, P. et A. Das (2004). Principles of Transportation Engineering, PHI Learning Pvt. Ltd.
Chandler, R. E., R. Herman, et al. (1958). "Traffic Dynamics: Studies in Car Following." Operations Research 6(2): 165-184.
Chaudy, C., J. F. Delaigle, et al. (2004). Analyse du trafic routier par caméra intelligente: MvTraffic, Université catholique de Louvain.

Chen, X., L. Li, et al. (2010). "A Markov Model for Headway/Spacing Distribution of Road Traffic." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 11(4): 773-785.
Chevreuil, M. (2002). IVHW: An inter-vehicle hazard warning system concept within the DEUFRAKO program. Lyon, France, e-Safety.
Chin-Woo, T., P. Sungsu, et al. (2008). "Prediction of Transit Vehicle Arrival Time for Signal Priority Control: Algorithm and Performance." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 9(4): 688-696.
Chisalita, L. et N. Shahmethri (2002). A peer-to-peer approach to vehicular communication for the support of traffic safety applications. IEEE Int. Conf. Intell. Transp. Syst.**:** 336-341.
Chong, W., W. Hongyi, et al. (2007). RFID-Based 3-D Positioning Schemes. INFOCOM 2007. 26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE.
CICAS (2009). Cooperative Intersection Collision Avoidance Systems (CICAS), U.S. Department of Transportation (USDOT).
Cohen, S. (1993). Ingénierie du Trafic Routier. Eléments de théorie du trafic et applications, Presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées.
Coopers. (2006). "CO-OPerative SystEms for Intelligent Road Safet : http://www.coopers-ip.eu/."
Corréïa, A. (2007). Modélisation de conflits dans l'algèbre des dioïdes - application à la régulation de trafic dans les carrefours. Laboratoire Système et Transport. Belfort, l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. Thèse. Docteur en automatique: 172.
Corréïa, A., A. Abbas-Turki, et al. (2006). "A dioid model of urban traffic." WSEAS transacation on systems 5: 1223-1228.
Correia, A., A. Abbas-Turki, et al. (2009). "A Dioid Model for Invariant Resource Sharing Problems." Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on 39(4): 770-781.
Cowan, R. (1978). "An Improved Model for Signalized Intersections with Vehicle-Actuated Control." J. Appl. Prob. 15: 384-396.
Cremer, M. et J. Ludwig (1986). "A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations." Math Comput Simul 28(4): 297-303.
CVIS. "http://www.cvisproject.org/ ".
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): 269-287.
De la Bretegue, L. et R. Jezeguel (1979). "Adaptive control at an isolated intersection - a comparative study of some algorithms." Traffic Engineering & Control 20: 361-363.
Dean, T. (1995). Artificial Intelligence: Theory and Practice, Addison Wesley.
Dell'Olmo, P. et P. B. Mirchandani (1996). "A Model for Real-Time Traffic Coordination Using Simulation Based Optimization." Advanced Methods in Transportation Analysis, (ed. L. Bianco and P. Toth) Springer-Verlag, Germany: 525-546.
Di Febbraro, A., D. Giglio, et al. (2004). "Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 5(4): 224-237.
Diakaki, C. (1999). Integrated Control of Traffic Flow in Corridor Networks. Department of Production Engineering andManagement. Chania, Greece, Technical University of Crete. Ph.D. Thesis.
Diakaki, C. et M. Papageorgiou (2000). Integrated traffic-responsive urban corridor control strategy in Glasgow, Scotland-application and evaluation," McLean, T. U.S. Dept. Transp.,Washington,DC, Transp. Res. Record 1727.
Diakaki, C., M. Papageorgiou, et al. (2002). "A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control." Control Eng. Practice 10: 183-195.
Diakaki, P., D. Kotsialos, et al. (2003). "Review of road traffic control strategies." Proceedings of the IEEE 91(12): 2041-2042.
DiCesare, F., P. T. Kulp, et al. (1994). "The application of Petri nets to the modeling, analysis and control of intelligent urban traffic networks " Lecture Notes in Computer Science 815/1994: 2-15.

Dorigo, M., M. Birattari, et al. (2006). "Ant colony optimization." Computational Intelligence Magazine, IEEE 1(4): 28-39.
Dorigo, M. et C. Blum (2005). "Ant colony optimization theory: A survey." Theoretical Computer Science 344(2-3): 243-278.
Dorigo, M. et L. M. Gambardella (1997). "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 1(1): 53-66.
Dorigo, M. et T. Stutzle (2004). Ant Colony Optimization, MIT Press.
Dresner, K. (2009). Autonomous Intersection Management. University of Texas at Austin. Ph.D. Thesis.
Dresner, K. et P. Stone. (2004a). "http://www.cs.utexas.edu/users/kdresner/papers/2004aamas/."
Dresner, K. et P. Stone (2004b). Multiagent traffic management: a reservation-based intersection control mechanism. Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2004. AAMAS 2004. Proceedings of the Third International Joint Conference on**:** 530-537.
Dresner, K. et P. Stone (2006). Traffic intersections of the future. The Twenty- First National Conference on Artificial Intelligence, NECTARTrack (AAAI 06)**:** 1593–1596.
Dresner, K. et P. Stone (2008a). "A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management. ." Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR).
Dresner, K. et P. Stone (2008b). Mitigating Catastrophic Failure at Intersections of Autonomous Vehicles. The Fifth Workshop Agents in Traffic and Transportation (ATT 08), Estoril, Portugal.
EFFIA, UTBM_SET, et al. (2008). Etude de définition pour la desserte en transport collectif et l'intermodalité autour de la futrue gare TGV de l'aire urbaine : Phase 3.
Fan, B. et H. Krishnan (2006). Reliability Analysis of DSRC Wireless Communication for Vehicle Safety Applications. Intelligent Transportation Systems Conference, 2006. ITSC '06. IEEE.
Fang, F. C. et L. Elefteriadou (2006). "Development of an Optimization Methodology for Adaptive Traffic Signal Control at Diamond Interchanges." Journal of Transportation Engineering 132(8): 629-637.
Fang, F. C. et L. Elefteriadou (2008). "Capability-Enhanced Microscopic Simulation With Real-Time Traffic Signal Control." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 9(4): 625-632.
Farges, J. L., J. J. Henry, et al. (1983). The PRODYN real-time traffic algorithm 4th IFAC Symposium on Transportation Systems. Baden Baden,W.Germany**:** 307-312.
FCC (2006). In the Matter of Amendment of the Commission's Rules Regarding Dedicated Short-Range Communication Services in the 5.850-5.925 GHz Band (5.9 Hz Band) Federal Communications Commission
Febbraro, A. D. et N. Sacco (2004). "On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets." Control Engineering Practice 12(10): 1225-1239.
Fellendorf, M. et P. Vortisch (2001). Validation of the microscopic traffic flow model VISSIM in different real-world situations. The Annual Meeting, TRB. Washington, DC.
FHWA (2005). Traffic control systems handbook, Dunn Engineering Asociates and Siemens Intelligent Transportation Systems.
Fritzsche, H. (1994). "A model for traffic simulation." Traffic Engineering & Control 35(5): 317-321.
Fujimoto, A., K. Sakai, et al. (2008). Toward Realization of Smartway in Japan. 15th World Congress on Intelligent Transport Systems and ITS America's 2008 Annual Meeting. New York NY.
Fukui, M. et Y. Ishibashi (1996). "Traffic Flow in 1D Cellular Automaton Model Including Cars Moving with High Speed." Journal of the Physical Society of Japan 65: 1868-1870.
Gallego, J.-L., J.-L. Farges, et al. (1996). "Design by Petri nets of an intersection signal controller." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 4(4): 231-248.
Garber, N. J. et L. A. Hoel (1997). Traffic and Highway Engineering, PWS Publishing Company, Boston, MA 02116.

Gartner, N. (1983). "OPAC: A Demand-Responsive strategy for traffic signal control." Transportation Research Record 906: 75-81.
Gartner, N. H. (1991). Road traffic control: Progression methods, Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems,M. Papageorgiou, Ed, Oxford, U.K.: Pergamon**:** 391-396.
Gartner, N. H., S. F. Assmann, et al. (1991). "A multiband approach to arterial traffic signal optimization." Transp. Res.B 25: 55-74.
Gazis, D. C. (2002). Traffic Theory. Boston, MA: Kluwer.
Gazis, D. C., R. Herman, et al. (1961). "Nonlinear Follow The-Leader Models of Traffic Flow." Operation Research 9(4): 545-567.
Gazis, D. C. et R. B. Potts (1963). The oversaturated intersection. Proc. 2nd Int. Symp. Traffic Theory**:** 221-237.
Gehring, O. et H. Fritz (1997). Practical results of a longitudinal control concept for truck platooning with vehicle to vehicle communication. Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on**:** 117-122.
Gerlough, D. L. (1956). "Simulation of freeway traffic by an electronic computer." Highway Research Board Proceedings 35: 543-547.
GERTRUDE (1980). GERTRUDE: Test d'efficacité du système de régulation de Bordeaux Bagneux, UTC Bordeaux et CETUR.
Gipps, P. G. (1981). "A behavioural car-following model for computer simulation." Transportation Research Part B: Methodological 15(2): 105-111.
Gipps, P. G. (1986). "Multsim: a model for simulating vehicular traffic on multi-lane arterial roads." Mathematics and Computers in Simulation 28(4): 291-295.
Girard, A. R., J. B. de Sousa, et al. (2001). A control architecture for integrated cooperative cruise control and collision warning systems. Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on.
Gradinescu, V., C. Gorgorin, et al. (2007). Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication. Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th**:** 21-25.
Greenshields, B. D. (1935). " A Study of Traffic Capacity." Highway Research Board Proceedings 14: 448-477.
Greg Krueger, P. E. (2009). IntelliDrive^{SM} Strategic Plan 2009. ITS America Annual Meeting.
H. Gartner, N., C. J. Messer, et al. (1992). Traffic Flow Theory, FHWA.
Hall, R. W. (1999). Handbook of transportation science, Kluwer Academic Publishers.
Harris, A. J. (1964). "Following Distances, Braking Capacity and the Probability of Danger of Collision Between Vehicles." Australian Road Research Board, Proceedings 2,Part 1: 496-412.
Hassami, A. G. et A. G. Foord (2001). Systems safety-a real example (European rail traffic management system, ERTMS). Human Interfaces in Control Rooms, Cockpits and Command Centres, 2001. People in Control. The Second International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 481).
Herman, R. et R. W. Rothery (1969). Frequency and Amplitude Dependence of Disturbances in a Traffic Stream. Proceedings of 4th International Symposium on the Theory of Traffic Flow, Bonn, Germany.
Hoon-Je, W., Y. Bok-Joong, et al. (2009). Research into navigation Algorithm for unmanned ground vehicle using Real Time Kinemtatic (RTK)-GPS. ICCAS-SICE, 2009.
Hounsell, N. B., F. N. McLeod, et al. (2004). Bus priority at traffic signals: investigating the options. Road Transport Information and Control, 2004. RTIC 2004. 12th IEE International Conference on.
Hounsell, N. B., B. P. Shrestha, et al. (2007). "Using global positioning system for bus priority in London: traffic signals close to bus stops." Intelligent Transport Systems, IET 1(2): 131-137.
Hui, L., H. Darabi, et al. (2007). "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems." Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on 37(6): 1067-1080.

Hunt, P. B. (1982). "The SCOOT on-line traffic signal optimisatoin technique." Traffic Engineering & Control 23: 190-192.
INTERSAFE. (2006). "http://www.intersafe-2.eu/public."
J.Cook, W., W. H.Cunningham, et al. (1997). Combinatorial Optimization, Wiley-Interscience.
Jensen, K. (1986). "Coloured Petri Nets." Central Models and Their Properties, Advances in Petri Nets 1986-Part I 254: 248-299.
Jiacun, W., J. Chun, et al. (1999). Performance analysis of traffic networks based on Stochastic Timed Petri Net models. Engineering of Complex Computer Systems, 1999. ICECCS '99. Fifth IEEE International Conference on.
Jiung-yao, H. et T. Chung-Hsien (2008). Improve GPS positioning accuracy with context awareness. Ubi-Media Computing, 2008 First IEEE International Conference on.
Jizhang, S. et K. Kubik (1998). GNSS navigation system accuracy requirement for vehicle driving automation. Position Location and Navigation Symposium, IEEE 1998.
Junwei, L. et S. Su (2003). Modeling urban transportation systems with hybrid systems: an overview. Intelligent Transportation Systems, 2003. Proceedings. 2003 IEEE.
K.Burke, E. et G. Kendall (2005). Search Methodologies: Introductory Tutorials in Optimization and Decision Support Techniques, Springer.
Kain, C. (2006). RFID Safety and Security Applications and Issues in Transportation. TRB/USDOT RFID Planning Conference. La Jolla, CA.
Kais, M., L. Bouraoui, et al. (2005). A collaborative perception framework for intelligent transportation systems applications. Proc. World Congr. Intell. Transp. Syst.
Kamata, J. et T. Oda (1991). "Detectors for road traffic" Concise encyclopædia of traffic and transportation systems, Pergamon Press**:** 96–101.
Kanaris, A., P. Ioannou, et al. (1997). Spacing and Capacity Evaluations for Different AHS Concepts. The American Control Conference. Albuquerque, New Meixco**:** 2037-2040.
Kang-Zhi, L., D. Minh Quan, et al. (2006). "An Exponentially Convergent Control Algorithm for Chained Systems and Its Application to Automatic Parking Systems." Control Systems Technology, IEEE Transactions on 14(6): 1113-1126.
Kato, S., S. Tsugawa, et al. (2002). "Vehicle control algorithms for cooperative driving with automated vehicles and intervehicle communications." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 3(3): 155-161.
Kell, J. H. et I. J. Fullerton (1991). Manual of Traffic Signal Design, Institute of Transportation Engineers.
Kelly, A. (1994). A 3D state space formulation of a navigation kalman filter for autonomous vehicles. Technical report, CMU, CMU-RI-TR-94-19.
Kometani, E. et T. Sasaki (1959). Dynamic behaviour of traffic with a nonlinear spacing-speed relation. Symposium Theory Traffic Flow. New York**:** 105-109.
Krauss, S. (1997). Towards a unified view of microscopic traffic flow theories. IFAC Transportation System Conference. Chania, Greece**:** 941- 945.
Kutz, M. (2004). Handbook of transportation engineering, McGraw-Hill
Lam, T. et R. W. Rothery (1970). "Spectral Analysis of Speed fluctuations on a Freeway." Transportation Science 4(3).
Lam, W. H. K., S. C. Wong, et al. (2009). Transportation and Traffic Theory 2009: Golden Jubilee: Papers Selected for Presentation at ISTTT18, a Peer Reviewed Series Since 1959, Springer.
Lee, G. (1966). "A Generalization of Linear Car-Following Theory." Operations Research 14(4): 595-606.
Lewandowski, W., J. Azoubib, et al. (1999). "GPS: primary tool for time transfer." Proceedings of the IEEE 87(1): 163-172.
Li, J., N. Rouphail et R. Akçelik (1994). Overflow Delay Estimation for Intersections with Fully-Actuated Signal Control the 73rd Annual Meeting of TRB. Washington, DC.
Li, L., W. Fei-Yue, et al. (2007). Cooperative Driving at Lane Closures. Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE.

Li, L., S. Jingyan, et al. (2005). "IVS 05: new developments and research trends for intelligent vehicles." Intelligent Systems, IEEE 20(4): 10-14.
Li, L. et F.-Y. Wang (2006). "Cooperative Driving at Blind Crossings Using Intervehicle Communication." IEEE Transcations on Vehicular Technology 55(6): 1712-1724.
Lighthill, M. J. et G. B. Whitham (1955). "On kinematic waves, II : a theory on traffic flow on roads." Proceedings of the Royal Society 229A(317-345).
Lijuan, W. et C. Xuebo (2008). The automated vehicle merging based on virtual platoon. Automation and Logistics, 2008. ICAL 2008. IEEE International Conference on.
Lin, F. B. et F. Mazdeyasa (1983). "Delay Models of Traffic
Actuated Signal Controls." Transportation Research Record 905: 33-38.
List, G. F. et M. Cetin (2004). "Modeling traffic signal control using Petri nets." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 5(3): 177-187.
Little, J. D. C. (1961). "A Proof for the Queuing Formula: L = λW." Operation Research 9(3): 383-387.
Lu, M., W. Chen, et al. (2007). "Positioning and tracking construction vehicles in highly dense urban areas and building construction sites." Automation in Construction 16(5): 647-656.
Lu, M., K. Wevers, et al. (2005). "Technical Feasibiliy of Adavanced Driver Assistance Systems (ADAS) for Road Traffic Safety." Transportation Planning and Technology 28(3): 167-187.
Luh, J. Z. et C. Y. Lee (1991). "Stop Probability and Delay Estimations at Low Volumes for Semi-Actuated Traffic Signals." Transportation Science 25(1): 65-82.
Luo, J. et J.-P. Hubaux (2004). "A survey of inter-vehicle communication." School Comput. Commun. Sci., Swiss Fed. Inst. Technol., Lausanne,Switzerland, 2004.
Mahmassani, H. S. (2005). Transportation and traffic theory:flow, dynamics and human interaction : proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory, University of Maryland, College Park, Maryland, 19-21 July 2005, Emerald Group Publishing.
Mandiau, R., A. Champion, et al. (2008). "Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation." Applied Intelligence 28(2): 121-138.
Mannering, F. L., W. P. Kilareski, et al. (2004). Principles of HighwayEngineering andTraffic Analysis, 3rd ed, Hoboken, NJ:Wiley.
Manual, C. (2000). Highway capacity manual, 4ème édition, Transportation Research Board.
Mathias, P. (2005). The intelligent cooperative intersection as part of urban traffic control systems. 12th Intell. Transp. Syst., World Congr. San Francisco, CA.
May, A. (1990). Traffic Flow Fundamentals, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
Mehani, O. et A. de La Fortelle (2007). "Trajectory Planning in a Crossroads for a Fleet of Driverless Vehicles " Computer Aided Systems Theory 4739/2007: 1159-1166.
Miah, M. S. et W. Gueaieb (2007). An RFID-Based robot navigation system with a customized RFID tag architecture. Microelectronics, 2007. ICM 2007. Internatonal Conference on.
Michaud, F., P. Lepage, et al. (2006). "Coordinated Maneuvering of Automated Vehicles in Platoons." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 7(4): 437-447.
Mimuro, T., Y. Miichi, et al. (1996). Functions and devices of Mitsubishi active safety ASV. Intelligent Vehicles Symposium, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE.
Mirchandani, P. et L. Head (2001). "A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 9(6): 415-432.
Mirchandani, P. et D. E. Lucas (2001). Rhodes-ITMS Tempe field test project : Implementation and field testing of RHODES, a real-time traffic adaptive control system. FHWA-AZ01-447. Washington, D.C., Federal Highway Administration.
Mitropoulos, G. K., I. S. Karanasiou, et al. (2010). "Wireless Local Danger Warning: Cooperative Foresighted Driving Using Intervehicle Communication." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 11(3): 539-553.

Morris, R. W. T. et P. G. Pak-Boy (1967). "Intersection Control by Vehicle Actuated Signals." Traffic Engineering & Control 10: 288-293.
Morrish, D. (1980). "Area traffic control in Bordeaux: a contrast with British practice." Traffic engineering & Control 21(8).
Motawej, F., R. Bouyekhf, et al. (2011). "A dissipativity-based approach to traffic signal control for an over-saturated intersection." Journal of the Franklin Institute 348(4): 703-717.
Motsinger, C. et T. Hubing (2007). A review of vehicle-to-vehicle and vehicle-to-infrastructure initiatives University of Notre Dame, Clemson University
MParent, M. et A. De la Fortelle (2005). Cybercars : Past, Present and Future of the Technology. The 12th World Congress on Intelligent Transport System (ITS). San Francisco.
Murthy, A. S. N. et H. R. Mohle (2001). Transportation engineering basics, ASCE Publications.
Nagel, K. et M. Schreckenberg (1992). "A cellular automaton model for freeway traffic." J. Phys. I France: 2221 - 2229.
Nakamura, M., H. Kawashima, et al. (1994). Road-vehicle cooperation driving system. Vehicle Navigation Inf. Syst. Conf. Yokohama, Japan**:** 425-430.
Naumann, R., R. Rasche, et al. (1997). Validation and simulation of a decentralized intersection collision avoidance algorithm. Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on**:** 818-823.
Neuendorf, N. et T. Bruns (2004a). The vehicle platoon controller in the decentralised, autonomous intersection management of vehicles. IEEE International Conference on Mechatronics,2004. ICM '04**:** 375-380.
Neuendorf, N. et T. Bruns (2004b). The vehicle platoon controller in the decentralised, autonomous intersection management of vehicles. Mechatronics, 2004. ICM '04. Proceedings of the IEEE International Conference on**:** 375-380.
Newell, G. F. (1969). "Properties of Vehicle Actuated Signals: I. One-Way Streets." Transportation Science, 3: 30-52.
Newell, G. F. (1998a). "The rolling horizon scheme of traffic control." Transportation Research Part A : Policy and Practice 32: 39-44.
Newell, G. F. (1998b). "The rolling horizon scheme of traffic signal control." Transportation Research Part A: Policy and Practice 32(1): 39-44.
Newell, G. F. et E. E. Osuna (1969). "Properties of Vehicle-Actuated Signals: II. Two-Way Streets." Transportation Science 3: 99-125.
NHTSA (2005). Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report - Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC. Washington, D.C., U.S. Department of Transportation : National Highway Traffic Safety Administration**:** 46.
P. Bertsekas, D. (2007). Dynamic Programming and Optimal Control, Athena Scientific.
P. Miller, F., A. F. Vandome, et al. (2011). Recherche Operationnelle Alphascript Publishing.
Panwai, S. et H. Dia (2005). "Comparative evaluation of microscopic car-following behavior." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 6(3): 314-325.
Papageorgiou, M., C. Diakaki, et al. (2003). "Review of road traffic control strategies." Proceedings of the IEEE 91(12): 2043-2067.
Papageorgiou, M. et G. Schmidt (1991). "Freeway traffic modeling" Concise encyclopædia of traffic and transportation systems, Pergamon Press**:** 162-167.
Payne, H. J. (1971). "Models of freeway traffic and control." Mathematical Models of Public Systems 28(1).
Pipes, L. A. (1953). "An Operational Analysis of Traffic Dynamics." Journal of Applied Physics 24(3): 274-287.
Pitu, B. M. et Z. Ning (2007). "Queuing Models for Analysis of Traffic Adaptive Signal Control." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 8(1): 50-59.
Porche, I. et S. Lafortune (1997). Dynamic traffic control: decentralized and coordinated methods. Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on**:** 930-935.

Porche, I., M. Sampath, et al. (1996). A decentralized scheme for real-time optimization of traffic signals. Control Applications, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on.
Potts, C. N. et M. Y. Kovalyov (2000). "Scheduling with batching: A review." European Journal of Operational Research 120(2): 228-249.
René, D. et A. Hassane (1997). Du Grafcet aux réseaux de Petri. Paris, Hermes.
René, D. et A. Hassane (2005). Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets, Springer.
Reuschel, A. (1950). "Vehicle Movement in Platoon." Oesterreucguschen Ingenieur Archir 4: 193-215.
Robertson, D. I. (1969). "TRANSYT method for area traffic control." Traffic Engineering & Control 10: 276-281.
S. Hillier, F. et G. J. Lieberman (1995). Introduction To Operations Research McGraw-Hill Companies.
Sakaguchi, T., A. Uno, et al. (2000). Cooperative driving of automated vehicles with inter-vehicle communications. Intelligent Vehicles Symposium, 2000. IV 2000. Proceedings of the IEEE**:** 516-521.
Savari. (2010). "http://www.savarinetworks.com/products.html."
Scemama, G. (2006). CLAIRE++, un système indépendant de supervision de la congestion du trafic routier, fiche de présentation, Laboratoire Génie des Réseaux de Transport et Informatique Avancée (GRETIA, INRETS).
Schepperle, H., K. Böhm, et al. (2009). "Traffic Management Based on Negotiations between Vehicles - A Feasibility Demonstration Using Agents." Agent-Mediated Electronic Commerce and Trading Agent Design and Analysis 13: 90-104.
Schrijver, A. (2003). Combinatorial Optimization: Polyhedra and Efficiency, Springer.
Schulze, M., T. Mäkinen, et al. (2008). IP_D15: Final report (PreVENT), Preventive and Active Safety Applications Integrated Project.
Schwengler, T. et N. Pendharkar (2005). Testing of fixed broadband wireless systems at 5.8 GHz. Technical, Professional and Student Development Workshop, 2005 IEEE Region 5 and IEEE Denver Section.
Sen, S. et K. L. Head (1997). "Controlled Optimization of Phases at an Intersection." Transportation Science 31(1): 5-17.
Shelby, S. G. (2004). Single intersection evaluation of real-time adaptative traffic signal control algoritms. 84e Annual Meeting of the Tranportation Research Board (TRB)**:** 183-192.
Shiraki, Y., T. Ohyama, et al. (2001). "Development of an inter-vehicle communications system." OKI Tech. Rev. 187 68: 11–13.
Sims, A. G. et K. W. Dobinson (1980). "The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits." Vehicular Technology, IEEE Transactions on 29(2): 130-137.
SimTD (2010). Sim TD project profile Safe and Interlligent Mobility Test Field Germany.
Stutzle, T. et M. Dorigo (2002). "A short convergence proof for a class of ant colony optimization algorithms." Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 6(4): 358-365.
Sunitha, K. A., K. Prema, et al. (2010). Fuzzy based automatic multi-level vehicle parking using lab view. Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME), 2010.
Tan, H. S. et H. Jihua (2006). "DGPS-Based Vehicle-to-Vehicle Cooperative Collision Warning: Engineering Feasibility Viewpoints." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 7(4): 415-428.
Thomas, H. C., E. L. Charles, et al. (2009). Introduction to Algorithms, Third Edition, The MIT Press.
Tian, Z., M. Kyte, et al. (2001). "A Simulation Based Study on Traffic Operational Characteristics at All-Way Stop-Controlled Intersections." Transportation Research Record 1776: 75-81.
Tolba, C., D. Lefebvre, et al. (2005). "Continuous and timed Petri nets for the macroscopic and microscopic traffic flow modelling." Simulation Modelling Practice and Theory 13(5): 407-436.
TRB (2000). Highway capacity manual, 2000, Transportation Research Board.

Tsuboi, T., J. Yamada, et al. (2009). Cell design for next DSRC applications. Ultra Modern Telecommunications & Workshops, 2009. ICUMT '09. International Conference on: 1-5.
Tsuboi, T., J. Yamada, et al. (2010). WAVE design for next DSRC applications. Wireless Telecommunications Symposium (WTS), 2010: 1-6.
Tsugawa, S. (2002). Inter-vehicle communications and their applications to intelligent vehicles: an overview. Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE. 2: 564-569
Tsugawa, S., S. Kato, et al. (2001). A cooperative driving system with automated vehicles and inter-vehicle communications in Demo 2000. Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE: 918-923.
Tsung-hua, H., L. Jing-Fu, et al. (2008). Development of an automatic parking system for vehicle. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE: 1-6.
Tyack, F. G. (1938). "Street traffic signals, with particular reference to vehicle actuation." Electrical Engineers, Journal of the Institution of 82(494): 125-154.
Tzes, A., K. Seongho, et al. (1996). "Applications of Petri networks to transportation network modeling." Vehicular Technology, IEEE Transactions on 45(2): 391-400.
Uno, A., T. Sakaguchi, et al. (1999). A merging control algorithm based on inter-vehicle communication. Intelligent Transportation Systems, 1999. Proceedings. 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on: 783-787.
VanMiddlesworth, M., K. Dresner, et al. (2008). Replacing the Stop Sign: Unmanaged Intersection Control for Autonomous Vehicles. The Fifth Workshop Agents in Traffic and Transportation (ATT 08), Estoril, Portugal.
Vasirani, M. et S. Ossowski (2008). Towards reservation-based intersection coordination: an economic approach. Intelligent Transportation Systems, 2008. ITSC 2008. 11th International IEEE Conference on: 1-6.
Vincent, R. A. et C. P. Young (1986). "Self-optimizing traffic signal control using microprocessor: The TRRL "MOVA" strategy for isolated intersections." Traffic Engineering & Control 27: 385-387.
VISSIM. (2009). " http://www.ptvamerica.com/ ".
Vossiek, M., L. Wiebking, et al. (2003). Wireless local positioning - concepts, solutions, applications. Radio and Wireless Conference, 2003. RAWCON '03. Proceedings.
VSC (2007). Vehicle Safety Communications - Final Report, CAMP IVI Light Vehicle Enabling Research Program.
W¨ubbena, G., A. Bagge, et al. (1996). Reducing Distance Dependant Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the 9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-96).
Wahle, J., L. Neubert, et al. (2001). "A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic." Parallel Computing 27(5): 719-735.
Wani, K. (2006). The Fourth Phase of Advanced Safety Vehicle Project - Technologies for Collision Avoidance. ITS World Congress. London.
Webster, F. V. (1958a). Road Research Technical Paper. London, UK, Road Research Laboratory.
Webster, F. V. (1958b). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper 39, Road Res. Lab., Ministry Transport, HMSO, London, U.K.: 1-43.
White, C. E., D. Bernstein, et al. (2000). "Some map matching algorithms for personal navigation assistants." Transportation Research Part C: Emerging Technologies 8(1-6): 91-108.
Wiedemann, R. (1974). Simulation des Straßenverkehrsflusses, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8
Wiedemann, R. (1991). Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads. Advanced Telematics in Road Transport D. X. the Commission of the European Community, Brussels
Wischhof, L., A. Ebner, et al. (2005). "Information dissemination in self-organizing intervehicle networks " IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 6(1): 90-101.
Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2007a). Controlling a discrete model of two cascading intersections. Workshop International: Logistique & Transport 2007. Sousse, Tunisie: 215-220.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2007b). Discrete Intersection Signal Control. Service Operations and Logistics, and Informatics, 2007. SOLI 2007. IEEE International Conference on**:** 1-6.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2008). Régulation du trafic aux intersections: Prise en compte des véhicules prioritaires Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Bucqrest, Roumanie.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2009a). Discrete Methods for Urban Intersection Traffic Controlling. Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th**:** 1-5.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2009b). Intersection traffic control by a novel scheduling model. Service Operations, Logistics and Informatics, 2009. SOLI '09. IEEE/INFORMS International Conference on**:** 329-334.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2009c). "Régulation du trafic aux intersections: Prise en compte des véhicules prioritaires." Revue e-STA, France 6.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2010). Contextualized Traffic Controlling At Isolated Urban Intersection. The 14th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics: WMSCI 2010. Orlando, Florida, USA.

Wu, J., A. Abbas-Turki, et al. (2011). "Cooperative Driving: An Ant Colony System for Autonomous Intersection Management." Journal of Applied Intelligence.

Wunderlich, R., L. Cuibi, et al. (2008). "A Novel Signal-Scheduling Algorithm With Quality-of-Service Provisioning for an Isolated Intersection." Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 9(3): 536-547.

Ying, L., D. Yuguo, et al. (2004). An emerging field: intersection of A-Life and AI. Computer Supported Cooperative Work in Design, 2004. Proceedings. The 8th International Conference on. 2: 203-207

Zahaby, M., P. Gaonjur, et al. (2009). Location tracking in GPS using Kalman Filter through SMS. EUROCON 2009, EUROCON '09. IEEE**:** 1707-1711.

A.1. Modèle de poursuite : Gipps

Le modèle de poursuite est développé pour simuler le comportement de véhicules dans la rue. Le modèle de Gipps [Gipps 1981; Gipps 1986] est l'un des plus connus. Il est le noyau d'un simulateur commercial AIMUN [Anonyme 2002; Panwai et Dia 2005].

Dans le modèle de Gipps, le véhicule accélère pour atteindre une vitesse désirée et décélère lorsque le conducteur essaie d'éviter une collision avec un véhicule précédent.

La vitesse maximale du véhicule n à l'instant t+T (noté par $V_a(n, t+T)$) est exprimée comme suit :

$$V_a(n,t+T) = V(n,t) + 2{,}5 \times a(n) \times T \times \left(1 - \frac{V(n,T)}{V^*(n)}\right) \times \sqrt{0{,}025 + \frac{V(n,T)}{V^*(n)}} \qquad \text{(A. 1)}$$

Où

$V(n,t)$ = La vitesse du véhicule n à l'instante t ;

$V^*(n)$ = La vitesse désirée du véhicule ;

$a(n)$ = L'accélération du véhicule n ;

T = Le temps de réaction du conducteur.

La vitesse du véhicule est également influencée par les caractéristiques du véhicule et la limitation imposée par le véhicule précédent, telle que montré dans (A.2) :

$$V_b(n,t+T) = d(n) \times T + \sqrt{d(n)^2T^2 - d(n)\left(2 \times \big(x(n-1,t) - s(n-1) - x(n,t)\big) - V(n,t)T - \frac{V(n-1,t)^2}{d(n-1)}\right)} \qquad \text{(A.2)}$$

Où

$d(n)$ = La décélération maximale souhaitée par le véhicule n ;

$x(n,t)$ = La position du véhicule n à l'instante t ;

$x(n-1,t)$ = La position du véhicule précédent n-1à l'instante t ;

$s(n-1)$ = La longueur effective du véhicule n-1 ;

$d(n-1)$ = La décélération désirée du véhicule n-1.

Les formules (A.1) et (A.2) donnent une borne inférieure de la vitesse maximale désirée du véhicule n.

A.2. Modélisation des arrivées de véhicules par le processus stochastique de Poisson

En fonction de la formule de Poisson, si le débit d'arrivée vaut λ, la probabilité de l'arrivée des n véhicules pendant l'intervalle Δt , est exprimée comme suit :

$$P_n(\Delta t) = \frac{(\lambda \cdot \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda \cdot \Delta t} \tag{A. 3}$$

L'espérance du nombre d'arrivées de véhicules est égale :

$$\overline{n(\Delta t)} = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot P_n(\Delta t) = \sum_{n=0}^{\infty} n \cdot \frac{(\lambda \cdot \Delta t)^n}{n!} e^{-\lambda \cdot \Delta t} = (\lambda \cdot \Delta t) e^{-\lambda \cdot \Delta t} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{n(\lambda \cdot \Delta t)^{n-1}}{n!} \tag{A. 4}$$
$$= \lambda \cdot \Delta t$$

Le débit moyen est donc :

$$\frac{\overline{n(\Delta t)}}{\Delta t} = \lambda \tag{A. 5}$$

Pour générer les temps d'arrivée de véhicules qui satisfont la distribution de Poisson, il faut produire l'intervalle temporel entre deux véhicules successifs.

Supposons D une variable aléatoire qui représente l'intervalle temporel entre deux véhicules successifs. La probabilité où au moins un véhicule arrivera pendant l'intervalle Δt est :

$$p[D < \Delta t] = 1 - p_0(\Delta t) \tag{A. 6}$$

Où $p_0(\Delta t)$ indique la probabilité qu'aucun véhicule arrivera pendant l'intervalle Δt.

$$p_0(\Delta t) = \frac{(\lambda \cdot \Delta t)^0}{0!} e^{-\lambda \cdot \Delta t} = e^{-\lambda \cdot \Delta t} \tag{A. 7}$$

Donc

$$p[D < \Delta t] = 1 - e^{-\lambda \cdot \Delta t} \Leftrightarrow \Delta t = \frac{1}{\lambda} \cdot ln \frac{1}{1 - p[D < \Delta t]} \tag{A. 8}$$

Basée sur la formula (A.8), les temps d'arrivée T sont générés.

A.3. Algorithme de la régulation de NR1 basée sur la formule Webster

Les travaux présentés par [Gradinescu, Gorgorin et al. 2007] examinent la possibilité d'employer la communication sans-fil pour augmenter la précision de la mesure et pour adapter en fonction le calcul du cycle optimal. Le principe de ces travaux consiste à mesurer l'état du trafic durant le cycle courant, afin de renouveler le plan de feux pour la période suivante. Ceci rend le contrôle plus adéquat à la situation du trafic.

Les auteurs supposent que chaque véhicule est équipé d'un dispositif de communication sans-fil. De même en ce qui concerne le contrôleur placé au niveau de l'intersection avec des feux de signalisation traditionnels. Les véhicules communiquent avec le contrôleur dès qu'ils sont proches de l'intersection. Le contrôle est ainsi capable de mesurer avec précision le débit et d'optimiser la durée du cycle en fonction. La durée du cycle est calculée par la formule de Webster avec quelques modifications :

$$C_o = \frac{1.5L+5}{1-\frac{1}{X_c}\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{s_i}} \tag{A.9}$$

Où

C_o = La durée de cycle optimale

L = Le temps total perdu par cycle incluant le temps de feux jaune et rouge

n = Le nombre de phases

q_i = Le débit mesuré de la phase *i*

s_i = Le débit de saturation concernant la phase *i*

X_c = Le degré souhaité de l'utilisation intersection (il vaut de 0,95 à 1,0 selon la charge des routes).

Comme dans ce qui a été décrit précédemment, la durée du vert est basée sur la durée du cycle (A.9), le temps de vert est réparti entre les différentes phases selon ses charges comme suit :

$$G_i = (C_o - L)\frac{\frac{q_i}{s_i}}{\sum_{i=1}^{n}\frac{q_i}{s_i}} \tag{A.10}$$

Où

G_i = Le temps de vert réparti pour la phase *i*.

Cette méthode améliore l'approche basée sur le calcul du cycle optimal en introduisant des mesures les plus précises et plus récentes. Les résultats de l'application de cette approche témoignent de son adaptation rapide face aux variations du débit. Cette adaptation permet de meilleures performances, voire une réduction des émissions de polluants. Néanmoins, le principe de cette méthode n'éloigne pas du plan des feux fixe qui s'appuie sur les hypothèses du débit continu. Il est bien important de noter que le débit ne peut pas à lui seul refléter exactement l'état du trafic. Plus précisément, les mesures du débit ne nous permettent pas de distinguer entre deux états du trafic, à savoir congestionné et fluide. Plus précisément, pour le même débit, deux états correspondants du trafic : soit une densité faible, soit une densité élevée. En d'autres termes, un débit faible peut cacher une file d'attente importante ou un ralentissement du trafic lié à un incident ou tout simplement à une forte demande du trafic pour un courant particulier qui mériterait d'ailleurs une augmentation de sa durée du vert.

A.4. Algorithme de la régulation de NR2 Basée sur la longueur de la file d'attente de véhicules

Dans [Wunderlich, Cuibi et al. 2008], les auteurs proposent un nouveau modèle mathématique qui s'appuie sur d'une part la position de véhicules fournis par un dispositif embarqué couplé au GPS et la communication sans-fil et d'autre part le mouvement du véhicule. La position et la destination souhaitée du véhicule sont les seules informations utilisées par l'algorithme du régulateur. Le modèle du régulateur est tiré du domaine de la commutation de paquets dans les réseaux informatiques. Dans ce modèle, l'objectif du régulateur est de minimiser la longueur des files d'attente dans chaque rue puisque d'après le théorème de Little [Little 1961] prouve que le retard moyen subi par les véhicules dans le réseau du trafic est directement proportionnel à la longueur de la file d'attente en moyenne. Contrairement aux travaux précédents qui se basent sur la mesure du débit, la régulation s'effectue instantanément en fonction du nombre de véhicules présents.

Le principe de cet algorithme pour réguler le trafic dans l'intersection schématisée dans la Figure A- 1, est le suivant :

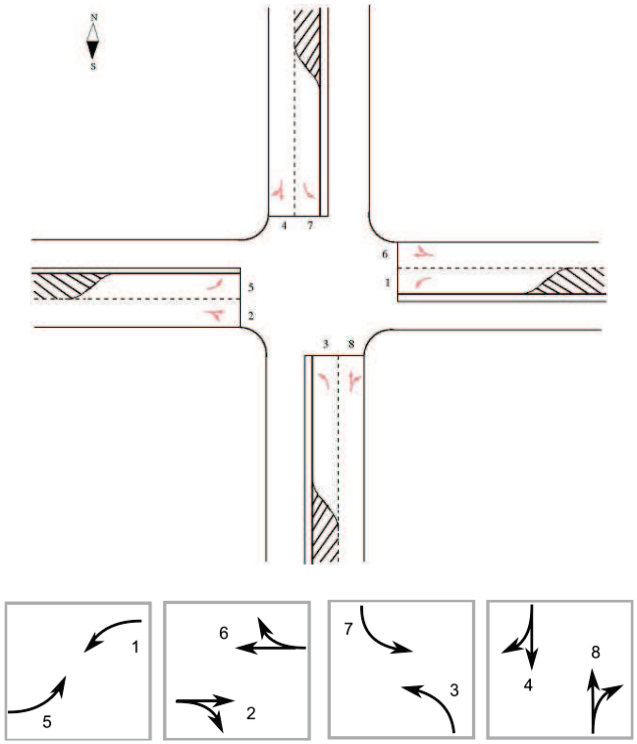
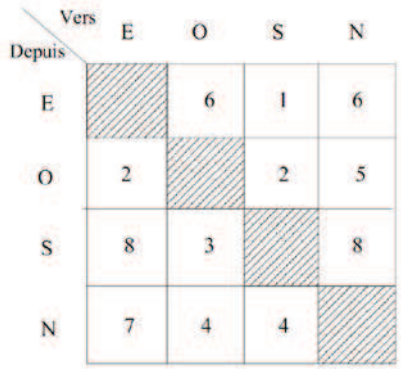


Figure A - 1. Schéma d'une intersection et découpage de phases [Wunderlich, Cuibi et al. 2008]

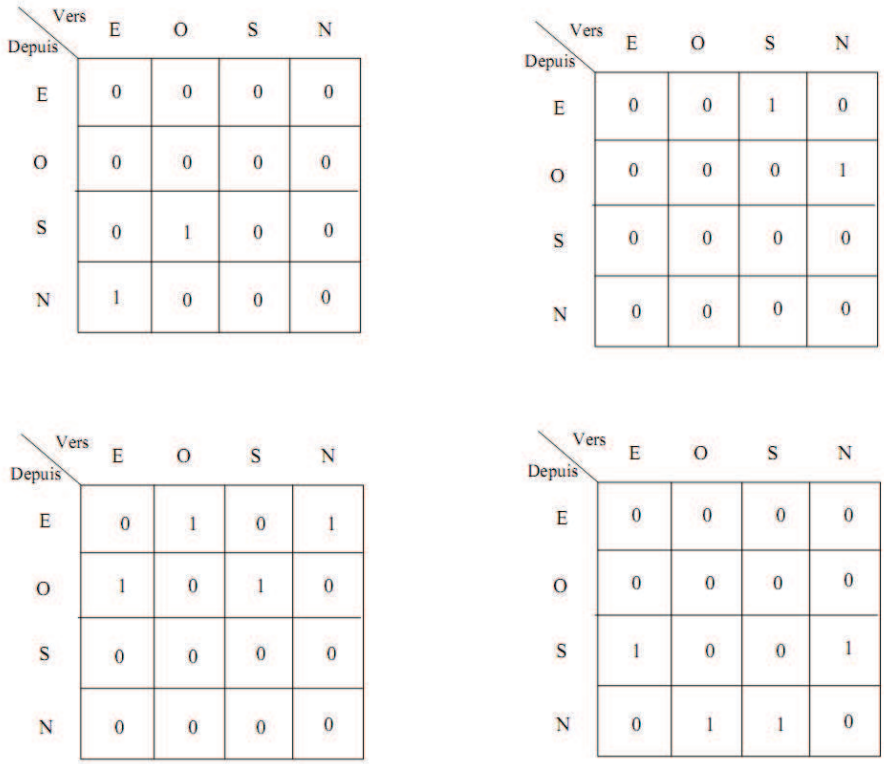
D'abord, une matrice concernant la relation entre les rues et les mouvements est établie (Figure A-2). Cette matrice ressemble à une matrice OD (Origine-Destination). Les majuscules E, O, S et N dans cette matrice représentent respectivement les différentes zones accessibles par l'intersection : Est, Ouest, Sud et Nord. Contrairement aux matrices OD qui représentent la demande, cette matrice indique les rues utilisées pour qu'un véhicule puisse effectuer le mouvement désiré. Par exemple, Si un véhicule venant de l'Est veut se déplacer vers le Sud, il doit prendre la rue 1. L'élément situé à la première ligne et à la troisième colonne est donc égale à 1.



Depuis \ Vers	E	O	S	N
E		6	1	6
O	2		2	5
S	8	3		8
N	7	4	4	

Figure A - 2. Diagramme de connexion de phase

Un ensemble de matrices de compatibilité est ensuite défini en fonction du découpage en phases de la matrice ci-dessus. Les éléments binaires des matrices de compatibilité sont définis de telle sorte que $S_{ii}(t)$ = 1 si et seulement si le régulateur permet aux véhicules venant des rues correspondantes de traverser l'intersection en même temps ; sinon $S_{ii}(t)$ = 0. Pour l'intersection présentée précédemment, il y a quatre matrices de compatibilité possibles, montrées dans la Figure A - 3. Chaque matrice correspond à une phase définie.



Depuis \ Vers	E	O	S	N
E	0	0	0	0
O	0	0	0	0
S	0	1	0	0
N	1	0	0	0

Depuis \ Vers	E	O	S	N
E	0	0	1	0
O	0	0	0	1
S	0	0	0	0
N	0	0	0	0

Depuis \ Vers	E	O	S	N
E	0	1	0	1
O	1	0	1	0
S	0	0	0	0
N	0	0	0	0

Depuis \ Vers	E	O	S	N
E	0	0	0	0
O	0	0	0	0
S	1	0	0	1
N	0	1	1	0

Figure A - 3. Matrices de compatibilité

Soit $Q(t) = [Q_{11}(t), Q_{12}(t), \cdots, Q_{44}(t)]$ le vecteur de la file d'attente dans lequel chaque élément représente le nombre de véhicules actuellement en file d'attente à l'instant *t*. Naturellement, ici $Q_{ii}(t) = 0$.

Ensuite, le poids des matrices de compatibilité pour chaque phase se calcule comme suit:

$$W(t) = \langle Q(t), S_{ij}(t) \rangle = \sum_{i,j} Q_{ij}(t) \cdot S_{ij}(t) \quad \text{(A.11)}$$

Le régulateur calcule toutes les combinaisons possibles des sommes des trois $W(t)$. La phase qui correspond à la valeur maximale de $W(t)$ obtient le droit de passage. Il est facile de déduire que cet algorithme a tendance à privilégier les mouvements avec le plus grand nombre de véhicules présents. De ce fait, ce régulateur est baptisé **Longest Queue First Maximal Weight Matching** (**LQF-MWM**). Les auteurs observent, à travers des simulations avec le logiciel VISSIM [VISSIM 2009], une amélioration considérable des temps d'attente quand les débits sont faibles. Cependant, ils constatent que lorsque les débits sont élevés, l'amélioration apportée n'est pas satisfaisante, voire décevante comparativement à la régulation adaptative. Ceci pourrait être dû aux changements fréquents des couleurs des feux. Une autre explication peut trouver l'origine de ce problème au niveau du système de signalisation car le vert qui est destiné pour vider un certain nombre de véhicules n'a pas fini tâche avant de passer au rouge.

A.5. Régulation des véhicules autonomes

Une nouvelle classe de travaux [Dresner et Stone 2004b; Dresner et Stone 2006] tente d'exploiter les potentialités de cette communication individualisée du droit de passage. Dans le cadre de leurs travaux, les auteurs supposent des véhicules autonomes. La régulation est basée essentiellement sur le système de réservation multi-agents. L'infrastructure est le seul responsable de la répartition des droits d'accès aux véhicules.

Ainsi ce système se compose en deux types d'agents: l'agent de contrôle et l'agent de conducteur. Pour chaque intersection, il y a un agent de contrôle responsable de guider les véhicules pour traverser l'intersection et pour chaque véhicule, un agent de conducteur est chargé de contrôler le véhicule. L'agent de conducteur informe l'agent de contrôle sur sa demande d'espace dans la zone de conflit avant son arrivée. L'agent de contrôle détermine si cette demande peut être satisfaite. En recevant la réponse de l'agent de contrôle, l'agent de conducteur enregistre la réponse et la prend en compte. Cette réponse peut être satisfaisante sinon il réalise une autre demande.

Pour déterminer si la demande peut être satisfaite, l'agent de contrôle calcule d'abord l'itinéraire du véhicule dans l'intersection en fonction de la destination. Supposons que l'intersection est divisée en carreaux $n \times n$ (Figure A - 4) , où n correspond à la granularité de l'agent de contrôle. Lorsqu'un agent de contrôle reçoit une demande, il estime la couverture des carreaux effectuée par cet itinéraire. Puis, il accepte une demande (requête) ou la refuse en fonction du principe du « Premier Arrivé Premier Servi ». C'est à dire, si deux véhicules ont envoyé des requêtes pour le même espace pendant un intervalle de temps commun, le véhicule qui envoie la requête en premier obtient la réservation. Le choix de cette politique peut être justifié théoriquement dans la mesure où les temps perdus pendant les arrêts sont négligeables [Correia, Abbas-Turki et al. 2009].

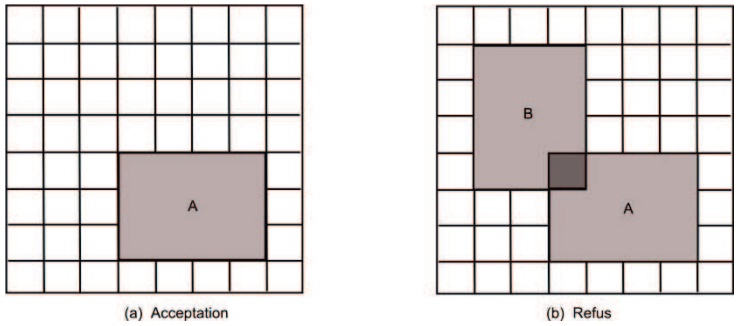


Figure A - 4. Dans le cas(a), les carreaux sont réservés au temps *t* pour le véhicule A; Dans le cas(b), la demande du véhicule B est refusée car elle concerne un carré utilisé par véhicule A au temps *t*

Les auteurs définissent aussi un protocole pour réaliser ce contrôle. Le protocole intègre deux principaux types de messages, à savoir les messages des véhicules adressés à l'intersection et les messages de l'intersection adressés aux véhicules.

- Véhicule → Intersection
    1. Requête – Ce message est envoyé lorsqu'un véhicule ne dispose pas de réservation et souhaite en faire une. Il contient les caractéristiques du véhicule (un identifiant unique du véhicule, la dimension du véhicule, etc.) ainsi que certaines propriétés concernant cette réservation (le temps d'arrivée, la vitesse d'arrivée, la rue d'arrivée, etc.).
    2. Changement de requête – Ce message est envoyé lorsque le véhicule dispose d'une réservation mais désire changer les paramètres de sa requête.
    3. Annulation – Le véhicule l'envoie s'il ne veut plus de sa réservation actuelle.
    4. Réservation achevée – Ce message est envoyé lorsqu'un véhicule a traversé l'intersection.

- Intersection → Véhicule
    1. Confirmation – Ce message est une réponse à la requête ou au changement de requête du véhicule.
    2. Refus – L'intersection informe un véhicule dont la requête n'est pas acceptable en envoyant ce message.
    3. Acquittement – L'intersection envoie ce message pour informer le véhicule de la réception du message d'annulation ou de réservation achevée.

Selon ce protocole, les véhicules ne peuvent pas entrer dans l'intersection sans réservation. Si un véhicule n'est pas encore entré dans l'intersection et ne dispose pas d'une réservation, il envoie alors une requête. L'intersection la reçoit et répond soit par un message de confirmation, soit par un message de refus. Si elle envoie le message de confirmation, elle assure la sécurité de ce véhicule pendant le processus de traversée de l'intersection et réalise une réservation pour lui. Si un message de refus est envoyé, le véhicule doit s'arrêter avant la zone de conflit.

Le véhicule possédant une réservation peut envoyer le message de changement de requête ou d'annulation. Si l'intersection reçoit le message de changement de requête, elle peut y répondre par un message de confirmation ou de refus. Si elle reçoit le message d'annulation, elle y répond par un acquittement et annule la réservation. Après la sortie de la zone de conflit, le véhicule envoie le message de réservation achevée. L'intersection ensuite supprime les paramètres du véhicule.

Les auteurs montrent aussi que ce système peut cohabiter avec les systèmes de signalisation actuels. Les auteurs partent de l'hypothèse que les systèmes de signalisation actuels sont dédiés aux conducteurs humains, tandis que le système de signalisation proposé admet seulement des

véhicules entièrement autonomes. S'il y a des véhicules conduits par les humains mélangés aux véhicules autonomes, l'intersection est informée des accès des véhicules conduits par l'humain. L'intersection pourrait alors réserver la place supplémentaire pour ces véhicules afin qu'ils traversent l'intersection sans conflit avec les véhicules autonomes. Toutefois, les résultats des simulations démontrent que si le nombre de véhicules conduits par les humains est élevé, les feux seraient probablement plus appropriés.

Pour tester ce nouveau système de signalisation, les auteurs ont développé un simulateur [Dresner et Stone 2004a]. Les résultats des simulations montrent que leur stratégie de régulation peut facilement contrôler des flux de circulation denses, avec des performances incomparables à celles obtenues des approches actuelles de la régulation au niveau des intersections. Néanmoins, l'approche proposée requiert que les véhicules autonomes intègrent un système extrêmement précis de positionnement et un contrôle très strict de la vitesse. D'ailleurs, le principe du contrôle (premier arrivé, premier servi) est trop simple car il ne considère ni l'intervalle temps de sécurité entre deux véhicules dans le même mouvement, ni celui des mouvements conflictuels. Ces deux facteurs sont très importants pour la sécurité des occupants.

A.6. Présentation du matériel du marquette SVAC

Le Robot NXT est commercialisé par l'entreprise LEGO. Le matériel utilisé pour construire un véhicule dans la maquette du SVAC comprend :

Un NXT micro-processeur

- un processeur ARM7 32 bits de 256 Ko de mémoire flash, 64 Ko de RAM
- un coprocesseur AVR 8 bits de 4 Ko de mémoire flash, 512 octets de RAM
- une communication sans-fil Bluetooth
- un port USB haute vitesse (12 Mbps)
- 4 ports d'entrée, plate forme numérique ou analogique à câbles à 6 fils
- 3 ports de sortie PWM pour commander les moteurs
- un écran graphique LCD 10 x 64 pixels
- haut-parleur



Le programme a été implémenté dans cette brique afin de contrôler l'ensemble des capteurs utilisés, les deux moteurs et la communication sans-fil entre les robots.

Un capteur ultrason

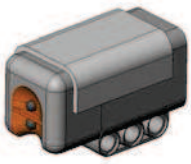
Le capteur ultrason permet au robot de détecter des objets. Il peut également mesurer des distances ou détecter des mouvements. La mesure de distance est de 0 à 255 *cm* avec une précision de ± 3 *cm*.



Ce capteur nous permettra de réaliser un mini régulateur avancé de la vitesse.

Un capteur couleur

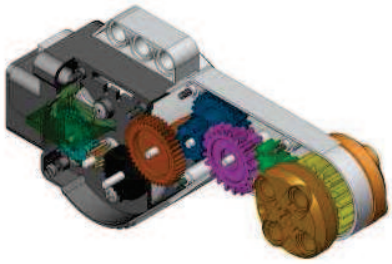
Le capteur couleur permet au robot de distinguer la lumière de l'obscurité. Il peut lire l'intensité lumineuse d'une pièce et mesurer l'intensité lumineuse des surfaces colorées. Il est constitué d'une diode



électroluminescente (LED) et d'un phototransistor, sensible aux variations de la lumière. Il renvoie une valeur calibrée sur une échelle de 0 à 100 et permet l'exécution de tâches en fonction de celle-ci.

Nous l'utilisons pour identifier le positionnement actuel de chaque robot (véhicule). Les différents airs en couleur tracée sur le sol permettent au robot d'identifier sa voie et sa zone de circulation. Il permet ainsi de corriger la distance estimée.

Deux servomoteurs interactifs



Les deux servomoteurs sont utilisés comme moteur de traction afin de déplacer le robot.

Chaque servomoteur interactif est composé d'un moteur à courant continu équipé d'un tachymètre (capteur de rotation). Le capteur de rotation permet de contrôler précisément les mouvements du robot. Il mesure également les rotations du moteur en degrés ou en nombre de rotations complètes (précision de ± 1°), ce qui permet au robot d'estimer sa position.

LISTE DES FIGURES

Figure 1- 1. Intersection à quatre branches avec mouvement tourne-à-gauche à priorité à droite (sans déplacements pédestres) 10
Figure 1- 2. Boucle de régulation d'une intersection isolée 11
Figure 1- 3. Exemple de découpage en phase d'une intersection à quatre branches 13
Figure 1- 4. Exemple de séquence de phases 14
Figure 1- 5. Ecart de temps inter-véhiculaire 16
Figure 1- 6. Diagramme fondamental 19
Figure 1- 7. Arrivées et départs des véhicules durant un cycle 21
Figure 1- 8. Exemple d'une séquence de simulation avec VISSIM (Sortie 11, A36) [EFFIA, UTBM_SET et al. 2008] 23
Figure 1- 9. Temps de cycle et la capacité de résorber le trafic 24
Figure 1- 10. Principe de fonctionnement du véhicule actionneur 26
Figure 1- 11. Exemple de fonctionnement d'un régulateur adaptatif au niveau d'une intersection isolée 28
Figure 1- 12. Exemple de circulation des véhicules dans la zone de conflit d'une intersection autonome 38

Figure 2- 1. Intersection élémentaire 43
Figure 2- 2. Infrastructure et véhicule 44
Figure 2- 3. Régulateur SVAC centralisé 46
Figure 2- 4. Régulateur SVAC décentralisé 47
Figure 2- 5. Évolution du débit effectif pendant le feu vert 49
Figure 2- 6. Observations du deuxième marqueur de position 50
Figure 2- 7. Contraintes temporelles 50
Figure 2- 8. Modèle RdP P-temporisé d'une intersection élémentaire 52
Figure 2- 9. Décomposition du problème [2,2] 55
Figure 2- 10. Graphe valué représentant la décomposition du problème [2,2] 56
Figure 2- 11. Représentation graphique de la résolution du problème de régulation 59
Figure 2- 12. Séquence optimale de passage des véhicules 59
Figure 2- 13. Simulation microscopique de toutes les séquences admissibles 60
Figure 2- 14. Graphe représentatif du déroulement de l'algorithme dans le cadre de l'intersection autonome 61
Figure 2- 15. Les comportements des véhicules dans l'intersection autonome 62
Figure 2- 16. Exemple de fonctionnement du SVAC décentralisé 65
Figure 2- 17. Simulation microscopique du SVAC décentralisé 66
Figure 2- 18. Interface du simulateur 67
Figure 2- 19. Capture d'écran pendant la simulation 67
Figure 2- 20. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules (SVAC centralisé, SVAC décentralisé) 68
Figure 2- 21. Comparaison des débits de sortie de véhicules (SVAC centralisé, SVAC décentralisé) 69
Figure 2- 22. Comparaison du retard moyen (SVAC centralisé, SVAC décentralisé) 69
Figure 2- 23. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente (SVAC centralisé, SVAC décentralisé) 69
Figure 2- 24. Comparaison des temps d'évacuation à base du modèle RdP 70
Figure 2- 25. Comparaison du retard moyen à base du modèle RdP 71
Figure 2- 26. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente à base du modèle RdP 71
Figure 2- 27. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches 73

Figure 2- 28. Comparaison des débits de sortie de sortie de véhicules entre les différentes approches 73
Figure 2- 29. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches 74
Figure 2- 30. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches 74

Figure 3- 1.Configuration d'une intersection à quatre branches 78
Figure 3- 2. Contraintes temporelles 79
Figure 3- 3. Modèle RdP P-temporisé d'une intersection à quatre branches 80
Figure 3- 4. Représentation graphique de la résolution du problème [3,3,2,1] 83
Figure 3- 5. Une séquence de passage optimale trouvée par la programmation dynamique 83
Figure 3- 6. Séquence initiale composée des pelotons compacts 85
Figure 3- 7. Nouvelle séquence après avoir renouvelé P_1 86
Figure 3- 8. Séquence obtenue après avoir renouvelé P_1 86
Figure 3- 9. Séquence obtenue après avoir renouvelé P_2 86
Figure 3- 10. Schéma d'un graphe $G = V, A, w$(arcs du nœud (1,2) sont détaillés) 87
Figure 3- 11. Analyse du paramètre q_0 92
Figure 3- 12. Analyse du paramètre β 93
Figure 3- 13. Analyse du paramètre m 94
Figure 3- 14. Analyse du paramètre C 95
Figure 3- 15. Le plus court chemin $C * S, T$ trouvé par l'algorithme de colonies de fourmis 96
Figure 3- 16.Séquence optimale de passage des véhicules montrée dans la Figure 3- 5 : les dates d'arrivée théorique des véhicules sont marquées à côte des véhicules 98
Figure 3- 17. Simulation microscopique du régulateur SVAC centralisé 99
Figure 3- 18. Comparaison des temps d'évacuation (Programmation dynamique, heuristique et Colonies de fourmis) 99
Figure 3- 19. Comparaison des débits de sortie des véhicules (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis) 100
Figure 3- 20.Comparaison du retard moyen (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis) 100
Figure 3- 21. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente (Programmation dynamique, Heuristique et Colonies de fourmis) 100
Figure 3- 22. Quatre scénarios pour une intersection à quatre branches 102
Figure 3- 23. Schématisation du fonctionnement du mapping pour le scénario (3) 104
Figure 3- 24. Modèle RdP pour le scénario (3) 105
Figure 3- 25. Schématisation du fonctionnement du mapping pour le scénario (4) 105
Figure 3- 26. Modèle RdP pour le scénario (4) 106
Figure 3- 27. Exemple de fonctionnement du régulateur SVAC centralisé (les temps d'arrivée estimée sont marqués au-dessus chaque véhicule) 110
Figure 3- 28. Simulation microscopique du régulateur SVAC décentralisé 110
Figure 3- 29. Comparaison des temps d'évacuation de véhicules (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé) 112
Figure 3- 30. Comparaison des débits de sortie de véhicules (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé) 112
Figure 3- 31. Comparaison du retard moyen (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé) 113
Figure 3- 32. Comparaison de la longueur moyenne des files d'attente (SVAC centralisé basé sur heuristique, SVAC décentralisé) 113
Figure 3- 33. Comparaison des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches avec les débits uniformes 114
Figure 3- 34. Comparaison des débits de sortie de véhicules entres les différentes approches avec les débits uniformes 114
Figure 3- 35. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches avec les débits uniformes 114

Figure 3- 36. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches avec les débits uniformes 115
Figure 3- 37. Comparaisons des temps d'évacuation des véhicules entre les différentes approches avec les débits non uniformes 115
Figure 3- 38. Comparaisons des débits de sortie de véhicules entre les différentes approches avec les débits non uniformes 116
Figure 3- 39. Comparaison du retard moyen entre les différentes approches avec les débits non uniformes 116
Figure 3- 40. Comparaisons de la longueur moyenne des files d'attente entre les différentes approches avec les débits non uniformes 116

Figure 4- 1. T-intersection entre le boulevard John Fitwgerald Kennedy, la rue de Belfort et le faubourg de Lyon, située à l'Ouest la ville de Belfort, France (Image provenant de http://maps.google.com) 120
Figure 4- 2. Schéma d'une T-intersection et son découpage en phases 120
Figure 4- 3. Capture d'écran pendant la simulation du système SVAC (chaque rectangle représente un véhicule ; la couleur de rectangle signifie si un véhicule obtient une clé : vert - clé ; rouge-sans clé) 122
Figure 4- 4. Retard moyen 123
Figure 4- 5. Longueur moyenne des files d'attente 123
Figure 4- 6. Vue globale de la maquette 124
Figure 4- 7. Vue de devant du véhicule 125
Figure 4- 8. Vue de dessous du véhicule 125
Figure 4- 9. Vue du régulateur 126
Figure 4- 10. Communication entre deux véhicules 126
Figure 4- 11. Quatre capteurs tactile relies respectivement à chaque NXT Micro-Processeur 127
Figure 4- 12. Communication entre trois robots (véhicules) et le régulateur dans 90 *s* 128
Figure 4- 13. Capture d'écran des tests 129
Figure 4- 14. Situation de blocage 130
Figure 4- 15. Dégager d'une situation de blocage 131

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1- 1. Résumé des avantages et inconvénients des différents capteurs usuels 17
Tableau 1- 2. Variables relevées par les instruments de mesure 18
Tableau 1- 3. Quelques exemples de fonctions permettant d'obtenir le diagramme fondamental où *a* et *b* sont des paramètres à définir par les techniques de régression 20
Tableau 1- 4. Systèmes de positionnement relatif 31
Tableau 1- 5. Comparaison entre le positionnement par le RFID et le GPS 32

Tableau 2- 1. Sémantique des transitions du modèle 52
Tableau 2- 2. Isomorphisme entre les séquences de véhicules et les chemins du [0,0] au [2,2] 56
Tableau 2- 3. Caractéristique des véhicules et de l'intersection 58
Tableau 2- 4. Données du problème 58

Tableau 3- 1. Données du problème 82
Tableau 3- 2. Facteurs expérimentaux 91
Tableau 3- 3. Analyse de paramètre α et ρ 92
Tableau 3- 4.Comparaison concernant la précision 97
Tableau 3- 5. Comparaison concernant la moyenne du temps de calcul (secondes) 97

Tableau 4- 1.Comparaisons de débit de sorite (*u.v.p*) 122
Tableau 4- 2. Niveau de service pour une intersection à feux 123
Tableau 4- 3. Statistiques globales: le cycle de véhicule 150 *ms* et le cycle du régulateur 90 *ms* 127

LISTE DES ACRONYMES

AC	Automate Cellulaire
CSV	Communication Sans-fil de Voisinage
DSRC	Dedicated Short Range Communications
GPS	Global Positioning System
LQF-MWM	algorithme de Longest Queue First Maximal Weight Matching
PAPS	Premier Arrivé, Premier Servi
PC	Peloton Compact
PER	Pourcentage de l'Ecart Relatif à la solution optimal
PNSO	Pourcentage du Nombre de Solution Optimale engendrée
RAV	Régulateur Avancé de la Vitesse
RdP	Réseaux de Petri
RFID	Radio-Frequency IdentiFication
RTK	Real-Time Kinematic
SP	Séquence de Pelotons
STI	Système de Transports Intelligents
SVAC	Système du Véhicule Actionneur Coopératif
TSP	Travelling Salesman Problem
V2I	Communication entre le véhicule et l'infrastructure
V2V	Communication inter-véhiculaire

Résumé

L'objectif de ce travail est d'exploiter les potentialités offertes par la conduite coopérative afin de fluidifier le trafic au niveau des intersections isolées. Pour ce faire, nous avons proposé un nouveau système de régulation au sein des intersections en s'inspirant du principe de l'intersection autonome. Nous avons appelé notre système : SVAC (système du véhicule-actionneur coopératif). Il repose sur la possibilité des échanges d'information entre le véhicule et son environnement de conduite.

Le SVAC permet une régulation plus précise du trafic puisqu'il se base sur les requêtes de droit de passage envoyées par les véhicules réellement présents dans l'intersection. En outre, grâce à la signalisation à bord, la régulation consiste à définir les séquences de passage des véhicules, ce qui permet de personnaliser la signalisation. Le gain de précision soulève plusieurs obstacles. D'une part, nous nous heurtons systématiquement à l'absence de modèles mathématiques permettant d'aborder le problème. D'autre part, la simple énumération des séquences implique une explosion combinatoire, ce qui ne convient pas à l'application temps-réelle de la régulation des intersections. Pour s'affranchir des deux problématiques nous avons utilisé les réseaux de Petri P-temporisés. Le modèle nous a permis de décrire sous la forme d'équations mathématiques les compteurs des différents évènements observés par les véhicules. Deux objectifs de régulation ont été dégagés après avoir déduit le temps moyen d'attente basé sur la formule de Little. Le premier consiste à vider les intersections au plus tôt. Nous avons proposé un algorithme de programmation dynamique et deux heuristiques. La première heuristique est directement issue de l'analyse des propriétés du problème posé. La deuxième est basée sur l'algorithme de colonies de fourmis. En effet, le problème défini est un cas particulier du problème du voyageur de commerce. Le deuxième objectif de régulation consiste à minimiser instantanément la longueur de la file d'attente. Dans ce cadre, nous avons supposé le fonctionnement à vitesse maximale du réseau de Petri. L'utilisation des contraintes sur les ressources nous a permis de définir des règles simples de régulation en utilisant le mapping.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé la simulation microscopique basée sur les lois de poursuite pour s'approcher du comportement de conduite. La simulation a servi pour la comparaison des différentes approches proposées dans ce mémoire avec les régulateurs adaptatifs et les intersections autonomes. Dans tous les cas notre approche se distingue par un gain de capacité, ce qui nous a encouragé de reproduire le SVAC à travers un prototype de robots. Cette maquette montre la faisabilité du système au moins pour des applications industrielles.

Mots-clés : Conduit coopérative, Réseaux de Petri P-temporisé, Programmation dynamique, Heuristiques, Algorithme de colonies de fourmis, Lois de poursuite

Abstract

The aim of this work is to benefit from the potential of the cooperative driving in order to optimize the traffic throughput at isolated intersections. To achieve this objective, we have proposed a new traffic control system for isolated intersections: Cooperative Vehicle-Actuation Signalization (CVAS). The concept of this new system is based on the assumption of the ability of exchanging information between each vehicle and the surrounding vehicles or the nearby infrastructure.

The system allows more precise control of the traffic since it determines the right-of-way of each vehicle according to its corresponding data sent by the embedded wireless device. The right-of-way is displayed to the driver by means of the onboard signalization. The control system determines the sequence of the vehicles to be directed through the intersection. For the sake of benefiting the improvement brought by the new system, we face several challenges. On the one hand, we are confronted with the absence of a mathematical model to address the control problem. On the other hand, despite the fact that the optimal passing sequence of vehicles can be found by the simple enumeration of all feasible sequences, the exhaustive search does not fulfill the requirements of the real-time application. To overcome these two problems, we seek help from the P-timed Petri nets. This mathematical modeling tool is able to describe the events observed by the position markers in the form of mathematical equations. Two different objectives of the control have been derived from the Little's formula. The first one aims to minimize the maximum exit time of vehicles present in the intersection. An algorithm of dynamic programming and two heuristics have been proposed to achieve this objective. The first heuristic is based on the analysis of the properties of the control problem. The second heuristic is based on the analogy between the dealt problem and the problem of Traveling Salesman Problem, which can be solved successfully by the algorithm of ant colony system. The second objective of the control is to instantly minimize the queue length. A protocol of relaying the right of way has been determined from the assumption of a Petri net that operates at its maximum speed. This simple protocol of control can be extended to all possible layouts of the isolated intersections by using the technique of "mapping".

In this work, a microscopic model (car-following model) is used to simulate the driving behavior. The simulations show that the CVAS system outperforms the other systems which are popularly used at present. It is even better than some innovative systems based on the technology of the cooperative driving. The good results encouraged us to replicate the system under real conditions through a prototype of NXT robots. The tests of this prototype prove the feasibility of the system at least for industrial applications.

Keywords: Cooperative driving, P-timed Petri nets, Dynamic programming, Heuristics, Ant colony system, Car-following model