



HAL
open science

Régulation coopérative des intersections : protocoles et politiques

Florent Perronnet

► **To cite this version:**

Florent Perronnet. Régulation coopérative des intersections : protocoles et politiques. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2015. Français. NNT : 2015BELF0259 . tel-01499565

HAL Id: tel-01499565

<https://theses.hal.science/tel-01499565>

Submitted on 31 Mar 2017

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.

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

Régulation coopérative des intersections

Protocoles et politiques

■ FLORENT PERRONNET

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

N° 2 | 6 | 0

THÈSE présentée par

FLORENT PERRONNET

pour obtenir le

Grade de Docteur de

l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

Spécialité : **Automatique**

Régulation coopérative des intersections Protocoles et politiques

Unités de Recherche :

Institut de Recherche sur les Transports, l'Énergie et la Société (IRTES),
Laboratoire Systèmes et Transports

Soutenue publiquement le 27 mai 2015 devant le Jury composé de :

YASSINE RUICHEK	Président	Professeur des Universités, UTBM
ARNAUD DE LA FORTELLE	Rapporteur	Professeur des Universités, Mines ParisTech
FAROUK YALAOUI	Rapporteur	Professeur des Universités, UTT
VINCENT COCQUEMPOT	Examineur	Professeur des Universités, Université de Lille 1
GÉRARD SEGARRA	Examineur	Ingénieur, Institut VeDeCoM de Versailles
OLIVIER GRUNDER	Examineur	Maître de Conférences-HDR, UTBM
ABDELLAH EL MOUDNI	Directeur de thèse	Professeur des Universités, UTBM
ABDELJALIL ABBAS-TURKI	Co-Directeur de thèse	Maître de Conférences, UTBM

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier le Professeur Abdellah El Moudni, mon directeur de thèse. Outre ses conseils, il m'a laissé une grande liberté dans mes recherches, tout en m'accordant sa confiance. Je remercie tout particulièrement Abdeljalil Abbas-Turki, mon co-directeur de thèse, pour son encadrement exemplaire. Il m'a accordé son temps sans limite pour me permettre d'avancer dans mon travail. Il m'a apporté son expérience, ses conseils, ses encouragements ainsi que des idées, qui m'ont permis d'avancer et d'attiser ma curiosité et mon envie d'approfondir le sujet.

Je remercie les Professeurs Arnaud De La Fortelle et Farouk Yalaoui pour avoir accepté de rapporter sur ce travail. Je remercie également le Professeur Yassine Ruichek, le Professeur Vincent Cocquempot, le maître de conférences-HDR Olivier Grunder, ainsi que Gérard Segarra, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ma thèse.

Je tiens également à remercier tout le personnel du laboratoire SeT, en particulier Olivier Lamotte, Philippe Descamps, Nicolas Gaud, Stéphane Galland, Franck Gechter, Ariane Glatigny et Fabrice Lauri, les collègues doctorants qui ont contribué à la bonne ambiance de travail: Alexandre Lombard, Cédric Boittin, Thomas Martinet, Gillian Basso, Zakaria Hammoudan, Georges Georgeos, Julian Murgia et Abderrahim Chariete. Je remercie également les stagiaires qui ont occupé le bureau: Lucas Benito, Maxime Grolleau, Jérémie Bourseau, Maxime Guériau et Lucas Renard.

Je remercie la société Voxelia et ses membres Mikaël Goncalves, Renan Zéo, Jocelyn Buisson et Charles Gaumet, pour avoir fourni son simulateur 3D et avec qui nous collaborons régulièrement.

Pour finir je remercie ma famille pour son soutien. Un grand merci tout particulier à mes parents et ma compagne qui sont toujours là dans les moments difficiles. Je remercie également la famille de ma compagne qui est toujours prête à aider et qui a offert son soutien avec de délicieux repas.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE N°1. REGULATION DU TRAFIC AUX INTERSECTIONS	5
INTRODUCTION	5
1.1 INTERSECTION	5
1.1.1 <i>Description et décomposition en zones</i>	6
1.1.2 <i>Signalisation</i>	6
1.1.3 <i>Feux tricolores</i>	7
1.2 REGULATION DES INTERSECTIONS A FEUX	9
1.2.1 <i>Infrastructure de mesure</i>	10
1.2.2 <i>Régulateurs</i>	11
1.2.3 <i>Discussion</i>	15
1.3 REGULATION EMERGENTE DU TRAFIC	17
1.3.1 <i>Véhicule émergent</i>	17
1.3.2 <i>Régulation coopérative d'une intersection isolée</i>	23
1.3.3 <i>Discussion</i>	30
CONCLUSION	31
CHAPITRE N°2. REGULATION DU TRAFIC AUX INTERSECTIONS	33
INTRODUCTION	33
2.1 IMPLEMENTATION (SYSTEME DU VEHICULE ACTIONNEUR COOPERATIF)	35
2.1.1 <i>Zonage</i>	36
2.1.2 <i>Implémentation logicielle</i>	37
2.1.3 <i>Architecture de communication</i>	39
2.1.4 <i>Discussion</i>	41
2.2 TESTS REELS	41
2.2.1 <i>Environnement de test</i>	42
2.2.2 <i>Observation comportementale</i>	43
2.2.3 <i>Cas critiques et priorité des messages</i>	43
2.2.4 <i>Question d'efficacité</i>	43
2.2.5 <i>Discussion</i>	44
2.3 CALCUL DE LA SOLUTION OPTIMALE PAR LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE	45
2.3.1 <i>Formulation du problème</i>	45
2.3.2 <i>Algorithme</i>	47
2.3.3 <i>Discussion</i>	48
2.4 MODELISATION RESEAU DE PETRI	48
2.4.1 <i>Introduction aux réseaux de Petri</i>	48
2.4.2 <i>Modélisation RPTM d'une intersection</i>	49
2.4.3 <i>Stratégie de contrôle</i>	54
2.4.4 <i>Discussion</i>	58
2.5 SIMULATIONS ET RESULTATS	58
2.5.1 <i>Simulateur de trafic</i>	59
2.5.2 <i>Intersections étudiées</i>	60
2.5.3 <i>Méthodes de régulation étudiées</i>	61
2.5.4 <i>Méthode de comparaison</i>	62

2.5.5	<i>Comparaison préalable</i>	62
2.5.6	<i>Comparaison approfondie de la méthode temps-réel PED</i>	65
	CONCLUSION	68
CHAPITRE N°3.	RÉGULATION COOPERATIVE D'UN RESEAU D'INTERSECTIONS	71
	INTRODUCTION	71
3.1	LITTERATURE ET INTERBLOCAGE	72
3.2	INTERBLOCAGE ROUTIER	73
3.2.1	<i>Système étudié et formulation du problème</i>	75
3.2.2	<i>Contraintes d'occupation et de réservation</i>	76
3.2.3	<i>Approche proposée</i>	78
3.3	STRATEGIE DE CONTROLE ANTI-INTERBLOCAGE	78
3.3.1	<i>Stratégie de décomposition</i>	79
3.3.2	<i>Architecture du protocole de prévention de l'interblocage</i>	80
3.3.3	<i>Contraintes de réservation et d'occupation à travers le protocole</i>	82
3.3.4	<i>Simulations</i>	86
3.3.5	<i>Résultats des simulations</i>	88
3.3.6	<i>Discussion</i>	90
3.4	STRATEGIE DE ROUTAGE DES VEHICULES	91
3.4.1	<i>Modélisation du problème</i>	91
3.4.2	<i>Politiques de calcul du plus court chemin</i>	92
3.4.3	<i>Simulations et résultats</i>	93
	CONCLUSION	97
CHAPITRE N°4.	REGULATION D'UNE INTERSECTION DE VEHICULES AUTONOMES	99
	INTRODUCTION	99
4.1	IMPLEMENTATION (MANAGEMENT D'INTERSECTION TRANSPARENT)	100
4.1.1	<i>Zonage</i>	100
4.1.2	<i>Architecture de communication</i>	101
4.1.3	<i>Stratégie de régulation</i>	102
4.1.4	<i>Tests réels</i>	106
4.2	ADAPTATION DU MODELE DE SUIVI DE VEHICULE IDM	108
4.2.1	<i>IDM</i>	108
4.2.2	<i>Extension d'IDM (CIDM)</i>	109
4.2.3	<i>Simulations</i>	110
4.2.4	<i>Discussion</i>	113
4.3	NOUVELLE METHODE DE SUIVI (RAV-TR)	114
4.3.1	<i>RAV-TR : Principe et équations</i>	115
4.3.2	<i>Simulations</i>	116
4.3.3	<i>Discussion</i>	124
	CONCLUSION	124
	CONCLUSION GENERALE	127
	BIBLIOGRAPHIE	131
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	145
	LISTE DES TABLEAUX	147
	LISTE DES ACRONYMES	149

INTRODUCTION GENERALE

Aujourd'hui, le transport des marchandises et des personnes tient une place importante des préoccupations au niveau mondial. On assiste à une augmentation sans précédent des besoins en déplacement, qu'ils soient professionnels ou personnels. La réponse à cette demande se traduit par la multiplication du nombre de véhicules de transport, mais également par la diversification des modes de déplacement. Dans la plupart des villes, cette augmentation engendre un niveau de saturation du réseau qui n'est pas acceptable au vu des problèmes importants qu'elle entraîne. En effet, on peut constater une augmentation dramatique du temps perdu dans les congestions, mais également du nombre d'accidents. De plus, Le niveau de pollution mondial devient alarmant, poussant les villes à interdire certains déplacements les jours où la pollution atteint un seuil critique. On assiste également à la volonté de développer des véhicules dits "propres" qui fonctionnent au gaz naturel, à l'électricité ou à la pile à combustible. Certaines villes misent aussi sur la mise en place d'un réseau de transport en commun performant (bus, tramways), ou encore sur la mise à disposition de moyens de transport en libre-service (vélos, voitures, camionnettes). Ces solutions peuvent contribuer à l'amélioration des conditions de circulation, mais toutes nécessitent une régulation du trafic adéquate.

La régulation du trafic en milieu urbain représente un défi permanent à cause de l'espace restreint. Il s'agit d'un problème de partage spatial et temporel des ressources. Jusqu'à aujourd'hui, l'amélioration de la gestion du partage des ressources repose sur la mise en place des feux tricolores, qui permettent d'autoriser à tour de rôle les flux de véhicules, en fonction des mouvements conflictuels et du temps. Les feux tricolores ont largement contribué à l'amélioration des conditions de circulation, ce qui a incité à multiplier les déplacements urbains. Cependant, malgré les développements théoriques autour de ce dispositif, celui-ci n'est aujourd'hui plus capable de supporter la demande du trafic. L'inconvénient majeur des feux tricolores est de considérer les véhicules sous forme de flux, ce qui se traduit par un manque de flexibilité du système de régulation (principe de cycle et de phases). En outre la commercialisation future des véhicules autonomes et communicants présage de nouveaux modes de régulation. En effet, ces véhicules devraient être capables d'une part d'échanger en temps réel les informations relatives à leurs déplacements et d'autre part d'appliquer des consignes précises.

Depuis quelques années, les avancées technologiques (communication sans-fil, positionnement, régulateur de vitesse, etc.) ouvrent de nouvelles perspectives dans le développement d'un nouveau type de régulation appelé "régulation coopérative". Elles contribuent notamment au développement des véhicules autonomes. La communication sans-fil permet actuellement de faire communiquer des véhicules entre eux (V2V) ou avec une infrastructure (V2I). On peut citer notamment la technologie Wi-Fi, mais également les nouveaux moyens de communication tels que les technologies 3G, 4G et notamment le G5 (IEEE 802.11p), qui permettent d'échanger d'importantes quantités d'informations de plus en plus rapidement. Dans le domaine du positionnement, les technologies GPS, DGPS, RTK, les radars, les lidars, les gyroscopes ou encore les accéléromètres offrent la possibilité d'obtenir

la position d'entités mobiles avec de plus en plus de précision. Grâce aux informations collectées en temps réel par les véhicules, ceux-ci sont maintenant capables de prendre tout ou partie du contrôle grâce à des systèmes comme les régulateurs adaptatifs de vitesse.

La régulation coopérative des intersections est basée sur la négociation du droit de passage, c'est-à-dire que chaque véhicule contribue à la régulation globale. Ainsi le passage d'une considération par flux vers une considération individuelle devrait permettre d'offrir un contrôle microscopique sur le passage des véhicules (chaque véhicule peut être accepté ou refusé). Cependant, le développement d'une politique de régulation coopérative efficace et sécurisée nécessite de surmonter plusieurs défis. En d'autres termes, il ne suffit pas que les véhicules soient capables de connaître leur position et de communiquer directement ou à travers l'infrastructure pour pouvoir traverser l'intersection sans risque de collision. En outre, même si la sécurité de passage est garantie, il est nécessaire que les nouveaux investissements contribuent à l'amélioration de la fluidité du trafic.

L'objectif premier des travaux présentés consiste à proposer une approche de régulation sécurisée (pas de collision) et efficace (trafic fluide) qui répond à l'équipement minimal requis pour faire de la régulation coopérative. La méthode doit donc s'adapter aux véhicules ordinaires équipés d'un système de communication, d'un système de positionnement et d'un affichage interne (tableau de bord) permettant d'indiquer au conducteur s'il a l'autorisation de traverser. Ensuite, nous souhaitons exploiter l'approche de régulation proposée pour résoudre les problèmes relatifs à la fluidité du trafic à l'échelle d'un réseau d'intersections. La congestion d'un réseau peut notamment mener à un problème d'interblocage. Il s'agit d'une situation dans laquelle plusieurs véhicules sont définitivement bloqués à cause du débordement de plusieurs files de véhicules dans les intersections. Il est donc nécessaire d'anticiper l'apparition de l'interblocage. De plus on s'intéresse au problème de routage de véhicules utilisé pour réduire les congestions en détournant des véhicules de leur trajet initial. Nos travaux consistent également à affiner les consignes transmises aux véhicules pour profiter de la robotisation des fonctions de conduite.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous rappelons les principes de base de la régulation par feux tricolores. Puis nous présentons l'état actuel des travaux sur les méthodes de régulation émergente, c'est-à-dire une régulation basée sur l'utilisation de la technologie de communication sans-fil, les systèmes de positionnement ainsi que les différents systèmes d'aide à la conduite.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons une méthode de régulation coopérative d'une intersection isolée. Des tests réels ont été menés grâce à l'utilisation de véhicules ordinaires équipés d'un minimum de technologie. Un modèle réseau de Petri ainsi qu'une stratégie de régulation sont proposés et éprouvés à travers des simulations.

Le troisième chapitre est consacré à la régulation dans un réseau d'intersections à partir de la méthode développée dans le deuxième chapitre. Nous proposons une méthode de prévention de l'interblocage pour assurer la fluidité du trafic. Des politiques de routage des véhicules sont également présentées pour établir la possibilité ou non d'améliorer le trafic par la modification des trajets.

Le quatrième et dernier chapitre s'intéresse aux véhicules autonomes et leur capacité d'adapter leur vitesse par rapport aux obstacles. Dans ce sens nous proposons une méthode de synchronisation des vitesses pour améliorer la fluidité du trafic en évitant les arrêts inutiles des véhicules.

CHAPITRE N°1. REGULATION DU TRAFIC AUX INTERSECTIONS

Introduction

La régulation des intersections a été au cœur des dispositifs visant à l'amélioration des conditions du trafic dans le milieu urbain. Plus précisément, les feux tricolores ont largement contribué à l'expansion du trafic à travers l'affectation de l'infrastructure entre différents mouvements conflictuels. Initialement conçus pour améliorer la sécurité de passage des véhicules aux intersections, ils ont bénéficié ensuite de plusieurs développements théoriques et technologiques pour garantir au mieux la fluidité du trafic. Cependant, les feux tricolores ne suffisent plus aujourd'hui à résorber le trafic face à l'augmentation constante de la demande de déplacement.

En parallèle, l'évolution technologique nous laisse entrevoir la commercialisation de véhicules autonomes et coopératifs en 2020. Ces véhicules seront capables de se déplacer sans intervention humaine et d'échanger des données avec leur environnement. Cette perspective offre de nouvelles possibilités de régulation du trafic notamment aux intersections. Cependant, l'exploitation du potentiel offert par les technologies émergentes nécessite de reformuler le problème du partage de l'infrastructure entre les mouvements conflictuels.

Ce chapitre met en évidence cette nécessité, d'une part en discutant les approches actuelles de régulation par les feux tricolores et d'autre part en présentant les travaux récents sur la régulation coopérative des intersections. Bien que les intersections urbaines admettent les mouvements des piétons, des cyclistes ou encore des trams, ce chapitre se focalisera sur les mouvements des véhicules routiers à moteur (voitures, camions, bus). En effet, constituant le flux dominant et à risque, le croisement des véhicules est au centre de la problématique de la régulation des intersections.

Ce chapitre est organisé en trois parties. Premièrement nous rappelons quelques concepts de base relatifs à une intersection. Ensuite nous décrivons les méthodes actuelles de régulation d'une intersection possédant un système de signalisation de type feux tricolores. Finalement nous abordons les méthodes de régulation émergentes utilisant le principe de la négociation individuelle du droit de passage, grâce à l'utilisation des technologies de communication sans-fil et de positionnement.

1.1 Intersection

L'intersection est le lieu où se décide l'affectation de l'infrastructure de déplacement aux différents mobiles. Les mobiles peuvent représenter toute entité qui peut être amenée à se déplacer dans l'environnement. Cependant, parmi l'ensemble des mobiles, ce sont les véhicules routiers à moteur qui ont soulevé la nécessité de la régulation des intersections. En effet le croisement des véhicules, de plus en plus nombreux et de plus en plus rapides, comporte des risques mettant en péril des vies humaines. En réponse à ces risques, l'intersection revêt d'un intérêt particulier, en la décomposant en zones et en la dotant d'un système de signalisation qui peut comporter des feux tricolores.

1.1.1 Description et décomposition en zones

Une intersection est un lieu critique contraint par le croisement d'au moins deux **mouvements** avec un angle non nul. On appelle **point conflictuel** tout croisement entre deux mouvements. Une intersection peut avoir plusieurs points conflictuels. Les **routes** qui permettent aux véhicules d'entrer dans une intersection peuvent être composées de plusieurs **voies**. Chaque voie admet un ou plusieurs mouvements. On nomme **courant** l'ensemble des mouvements qui appartiennent à la même voie d'origine. Nous considérons que les mouvements d'un même courant ne sont pas en conflit.

Une intersection peut être découpée en trois types de zone. La **zone de conflit** est le lieu où les mouvements peuvent se croiser. Il s'agit donc de la zone critique où le risque de collision est maximal. Celle-ci regroupe tous les points conflictuels. Les **zones de stockage** définissent les voies d'entrée de l'intersection, c'est-à-dire le lieu où les véhicules se mettent en attente (en fonction du mouvement souhaité) avant d'avoir la possibilité de traverser la zone de conflit. Les **zones de sortie** sont les endroits qui représentent la fin du conflit. Quel que soit le trajet d'un véhicule dans l'intersection, nous supposons que celui-ci doit traverser les zones dans un ordre précis : zone de stockage, zone de conflit puis zone de sortie.

La Figure 1.1 illustre un exemple d'intersection dans laquelle cohabitent 28 points conflictuels, 13 mouvements et 5 courants. En fonction du choix de la signalisation, il est possible de diriger les mouvements de manière à éviter les points conflictuels. C'est le cas par exemple des **tourne-à-gauche** qui proviennent de routes opposées. Ici, le tourne-à-gauche est géré à l'indonésienne.

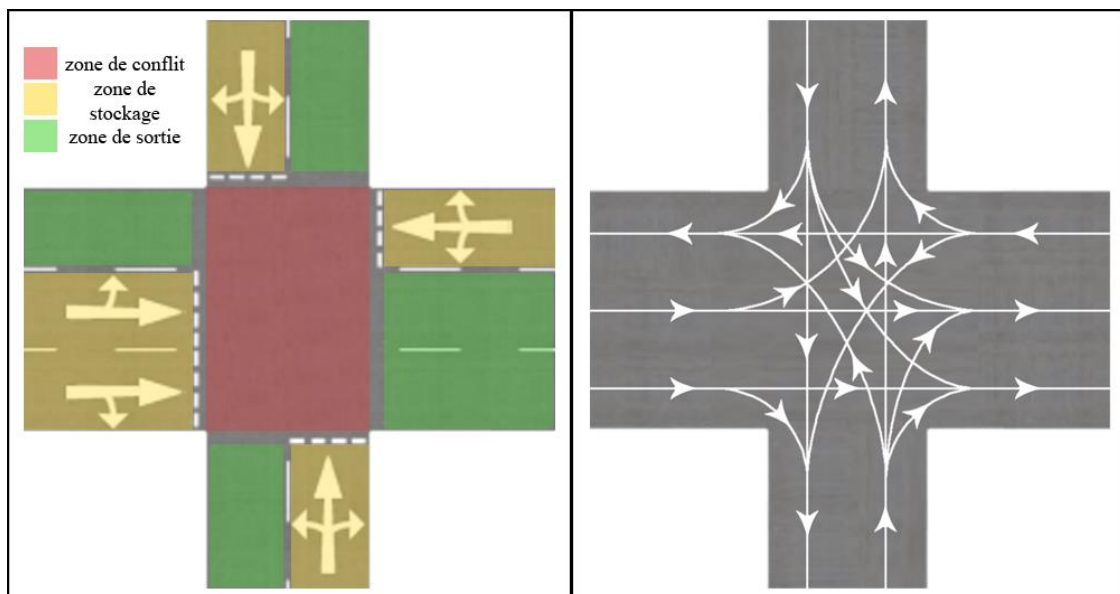


Figure 1.1 - Exemple d'intersection

1.1.2 Signalisation

La majorité des intersections possède un système de signalisation qui doit permettre aux conducteurs de savoir comment utiliser l'infrastructure. L'information peut être donnée grâce à un affichage vertical ou horizontal. Ainsi, le conducteur est informé grâce à l'utilisation de **panneaux**, d'un **marquage au sol** ou encore de **feux tricolores**. On peut référencer

principalement deux types d'information, celle de **priorité** et celle de **mouvement**. Une signalisation peut être placée à proximité de la zone de conflit et/ou en amont de l'intersection. On notera le cas particulier de l'intersection sans signalisation qui prévoit un respect de la règle "**priorité à droite**".

L'information de mouvement peut être définie par un marquage au sol (flèches) indiquant les directions autorisées ou des panneaux d'interdiction de certains mouvements. L'information de priorité se présente sous forme de panneaux ou à travers l'utilisation des feux tricolores. Les feux tricolores sont placés à l'entrée de la zone de conflit et sont prioritaires par rapport aux panneaux. Chaque couleur possède une signification qui peut légèrement différer entre les pays. Cependant la couleur **verte** indique le droit de passer, tandis qu'un feu **rouge** informe le conducteur de l'interdiction de traverser. En fonction du pays, un feu **jaune**, communément connu sous le nom de feu orange, peut être inséré pour indiquer un état particulier. Lorsqu'il est inséré après le vert, il s'agit d'annoncer un rouge éminent.

1.1.3 Feux tricolores

Les feux tricolores permettent d'éviter les conflits les plus dangereux en séparant les mouvements conflictuels par des fenêtres de temps. Ainsi, il s'agit d'un découpage temporel qui se traduit par deux mécanismes : le **cycle** et la **phase**. Une phase est constituée d'un groupe de mouvements autorisés à traverser simultanément la zone de conflit. Ainsi, une phase est caractérisée par un ensemble de mouvements et le temps attribué. Un cycle représente le temps nécessaire à l'autorisation successive de tous les groupes de mouvements. Le cycle est ainsi composé de plusieurs phases. Le choix des phases dépend largement des conflits potentiels entre certains mouvements. Cependant, la plupart du temps, il est impossible de supprimer tous les conflits sans la création d'un grand nombre de phases. Par exemple des voies opposées sont en général autorisées en même temps, forçant les conducteurs souhaitant tourner à gauche, à céder la priorité au flux arrivant en face. La Figure 1.2 illustre le cas classique rencontré pour une intersection à quatre branches avec tous les mouvements autorisés. Il s'agit d'un découpage du cycle en deux phases autorisant à tour de rôle R_1 avec R_2 (image gauche) et R_3 avec R_4 (image de droite).

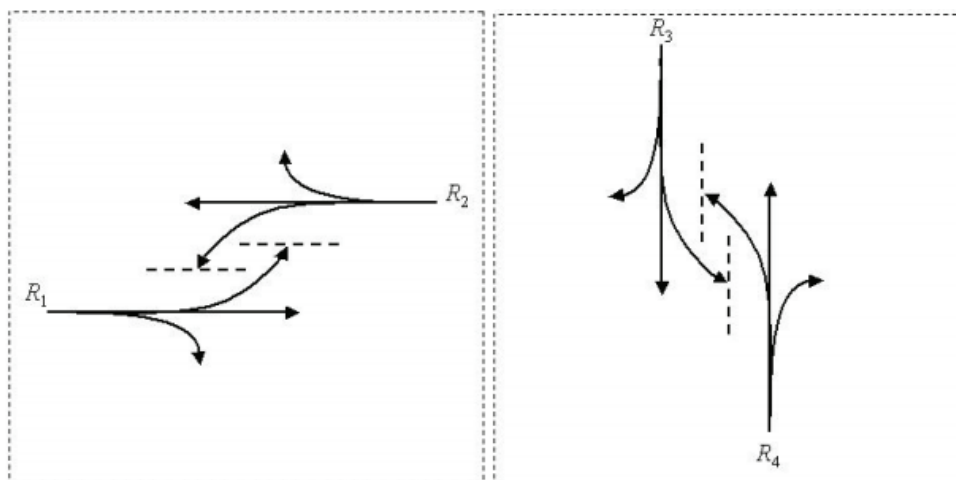


Figure 1.2 - Exemple de cycle pour une intersection classique à quatre voies et douze mouvements

La Figure 1.3 décrit le découpage temporel des phases de l'exemple précédent. La somme du vert et de l'orange d'une phase correspond au **vert effectif**. On note qu'il est nécessaire d'insérer un temps de **rouge intégral** au niveau de la transition entre deux phases, de manière à garantir un certain niveau de sécurité. Ce temps dépend de l'infrastructure et permet aux derniers véhicules présents de quitter la zone de conflit avant d'autoriser les mouvements conflictuels. On définit également les termes **vert utile** et **rouge utile**. Le vert utile représente le vert effectif moins la somme du temps perdu au démarrage et du temps perdu en fin d'orange. Le rouge utile d'une phase est le temps du cycle moins le temps du vert utile.

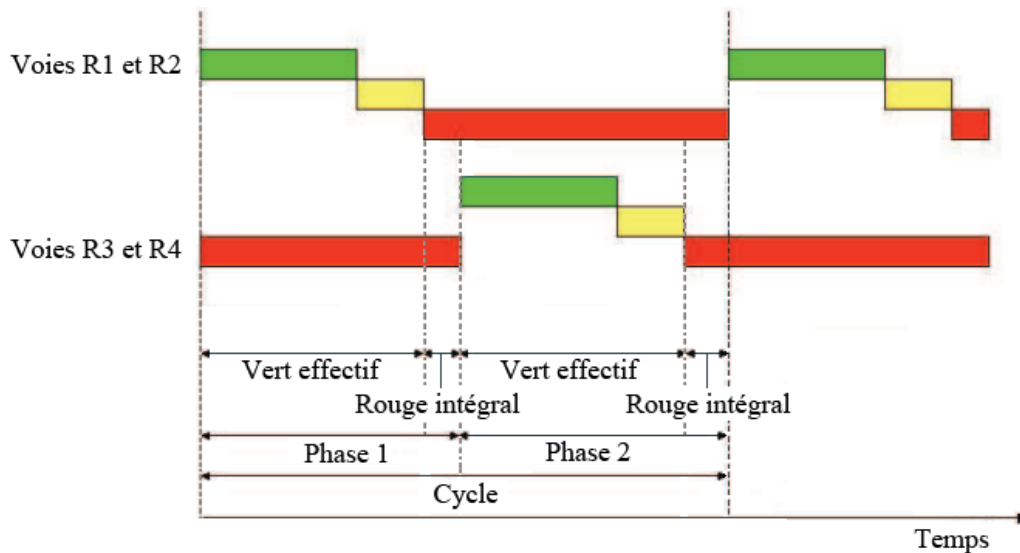


Figure 1.3 - Exemple de découpage d'un cycle en deux phases

Les durées du cycle et des phases ainsi que leur décomposition impactent directement la fluidité comme suit :

1. La durée du cycle : la somme des durées des verts utiles d'un cycle, à savoir le temps réellement exploité pour traverser l'intersection est inférieur au temps du cycle. La différence constitue un temps perdu incompressible. Ainsi, la capacité d'une intersection est proportionnelle à la durée du cycle. Cependant, lorsque la durée du cycle est longue, les durées des rouges sont importantes impliquant un allongement conséquent des files d'attente et leur débordement sur les intersections en amont.
2. Le nombre de phases : à cause du rouge intégral et des temps de démarrage et de freinage à chaque phase, le temps perdu dans un cycle est proportionnel au nombre de phases. Comme il a été cité précédemment, il arrive souvent que le découpage en phase n'élimine pas tous les mouvements conflictuels. Les conflits dits secondaires impliquant des mouvements tournant avec des décélérations sont gérés par le code de la route et le marquage au sol. Cependant, ces mouvements générant des conflits dits secondaires sont aussi capables de ralentir le trafic durant la phase. Il s'agit de chercher un compromis entre le temps perdu à chaque début et fin de phase et le temps perdu à cause des ralentissements dus aux mouvements tolérés comme les mouvements de tourne-à-gauche.
3. Les durées des phases : elles déterminent les temps attribués à chaque groupe de mouvements. La durée d'une phase doit être au moins capable d'évacuer les véhicules

accumulés pendant les autres phases. Lorsqu'un véhicule observe plus d'un rouge pour traverser l'intersection, ceci révèle la saturation de la phase et aussi la saturation du cycle.

Les durées des phases et du cycle ainsi que la décomposition du cycle en phases sont soumises à des calculs qui ont pour objectif de fluidifier le trafic aux intersections sous différents critères. Cependant, le découpage en phases est strictement lié à la géométrie de l'intersection, aux marquages au sol et aux agencements des feux tricolores. Une fois le découpage en phase déterminé, il n'est pas possible de le faire évoluer sans investissements importants. Il reste ainsi seulement la possibilité d'ajuster les durées des cycles et des phases en fonction de l'état du trafic. Le calcul de ces durées a fait l'objet de nombreux travaux de recherches afin de réguler le trafic aux intersections [1].

1.2 Régulation des intersections à feux

L'approche classique de calcul des durées optimales du cycle et des phases est basée sur le rapport entre la demande et la capacité de l'infrastructure. La demande du trafic et la capacité de l'infrastructure sont estimées en termes de débit. Le débit se définit comme le nombre de véhicules passant sur un point donné de la route pendant un intervalle de temps. La formule de Webster [2] permet de calculer le cycle optimal pour minimiser les temps d'attente des véhicules. Cette formule a été largement utilisée et adaptée pour les feux à cycle fixe, à savoir les feux gardant constant les durées de cycles et de phases ainsi que l'enchaînement des phases. Cependant, la capacité de l'infrastructure varie selon le type de véhicule et la demande évolue en fonction de la période de la journée. Ceci a nécessité d'introduire une boucle de régulation (voir Figure 1.4) aux intersections. Cette boucle est composée de l'**infrastructure de mesure**, du **régulateur**, et du système de **signalisation** (feux tricolores) décrit précédemment.

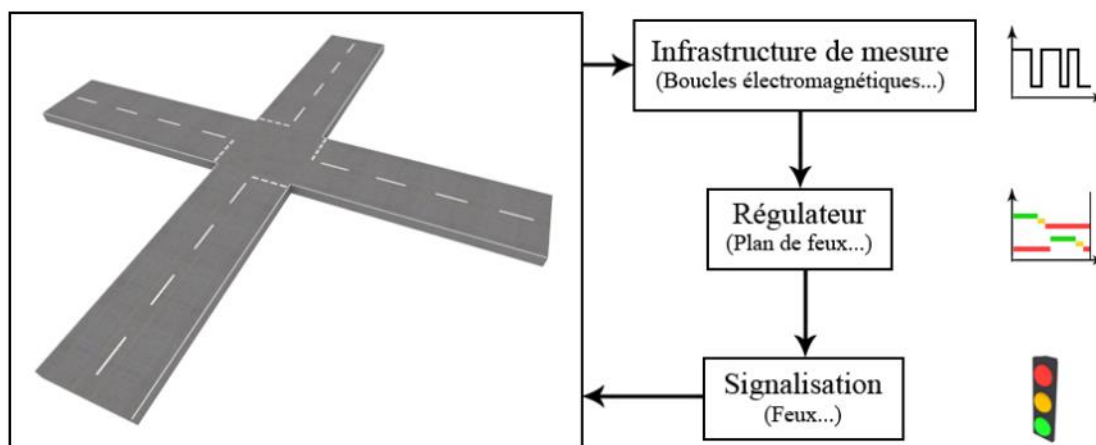


Figure 1.4 - Boucle de régulation d'une intersection

1.2.1 Infrastructure de mesure

L'utilisation des capteurs est la base de la collecte des informations sur le trafic routier. On peut distinguer plusieurs catégories, les capteurs intrusifs qui sont implantés directement dans la chaussée, les capteurs non-intrusifs qui sont placés en bord de chaussée, et les capteurs embarqués. Dans la version de base, les capteurs utilisés permettent de détecter la présence d'un véhicule à un point donné de l'infrastructure. Parmi les catégories de capteurs, on peut recenser de nombreuses technologies; boucle électromagnétique, capteur piézo-électrique, tube pneumatique, fibre optique, ultrason, laser, infrarouge, caméra vidéo [3]. On peut retenir trois principaux capteurs qui sont utilisés en majorité dans l'observation et la régulation du trafic (la boucle électromagnétique, le capteur à ultrason, le capteur vidéo).

1.2.1.1 La boucle électromagnétique

La boucle électromagnétique est le système le plus utilisé dans le monde pour la détection des entités mobiles. Elle permet de mesurer plusieurs variables globales sur un espace défini d'une route. Le capteur est directement placé sous la surface de la route, de manière à détecter le passage de chaque véhicule. Son fonctionnement est basé sur la génération d'un champ magnétique, qui subit des perturbations lors du passage des parties métalliques. Ces perturbations sont converties en tension. Le signal fourni est de type "tout ou rien" et est directement lié à la présence du véhicule. Une seule boucle électromagnétique permet un comptage simple. Lorsque, nous disposons de deux boucles voisines, le traitement des données émanant de la paire de boucles est capable de fournir plusieurs informations comme la longueur du véhicule ou encore sa vitesse. La collecte des données permet ensuite d'effectuer des statistiques sur un flux de véhicules, au cours d'une période de temps définie.

L'installation des boucles électromagnétiques est motivée depuis quelques années par le développement d'un système de collecte et de traitement des données, qui a été lancé à l'initiative du Ministère français des Transports. En effet, le programme SIREDO (Système Informatisé de REcueil de Données), propose un moyen pour centraliser les données du trafic de toute la France en temps réel et en temps différé, grâce à de nombreuses stations basées sur l'utilisation des boucles électromagnétiques [4]. C'est grâce à l'ajustement des courbes débits/vitesses ou des courbes débits/taux d'occupation émanant des boucles électromagnétique que l'on estime la capacité des voies.

1.2.1.2 Le capteur ultrason

Le capteur ultrason ou à effet Doppler est basé sur la mesure des perturbations des ondes projetées dans l'axe de la chaussée depuis un portique. La réflexion des ondes sur un obstacle mobile permet de déterminer sa présence grâce à l'analyse du temps de parcours de celles-ci entre l'émission et la réception. Il est également possible de déterminer la longueur du véhicule ainsi que sa vitesse en utilisant un échantillonnage.

1.2.1.3 Le capteur vidéo

Le capteur vidéo est principalement utilisé pour la surveillance, en particulier sur les autoroutes, dans le but d'observer le niveau de congestion et les incidents. La plupart du temps, cette observation nécessite un opérateur qui regarde en permanence des écrans. Depuis récemment, grâce notamment à l'amélioration de la qualité vidéo, de nombreuses méthodes

d'analyse et de surveillance ont été développées. L'analyse en temps-réel de l'image est principalement utilisée dans la détection automatique des congestions (DAB) et dans la détection des incidents (DAI). Les méthodes automatisées d'analyse d'image permettent la création de nombreuses applications [5,6] dont certaines ne se limitent pas seulement à la surveillance. Les caméras sont aussi utilisées pour mesurer l'occupation d'un espace donné par les véhicules. De la même manière que les boucles électromagnétiques, cette occupation permet de mesurer le débit (voir Figure 1.5). Un des avantages du capteur optique est sa simplicité d'installation sur un portique (voir Figure 1.5 (image de droite)) par rapport aux boucles électromagnétiques qui nécessitent des travaux au niveau de la chaussée (voir Figure 1.5 (image de gauche)).

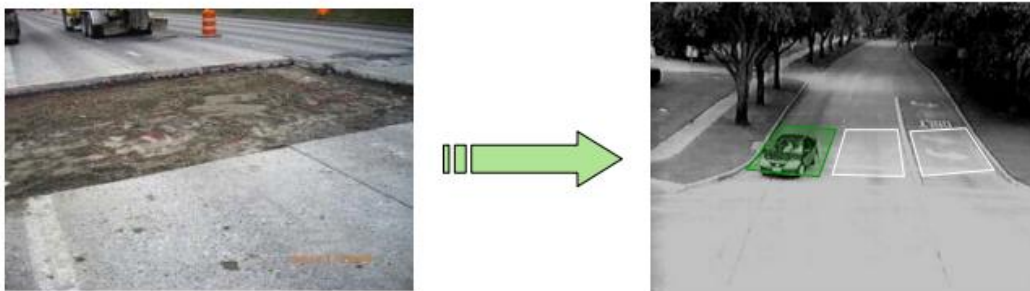


Figure 1.5 – Utilisation des caméras pour remplir la fonction des boucles électromagnétique

1.2.2 Régulateurs

A partir des hypothèses sur les débits d'arrivée des véhicules, il est possible de calculer les durées du cycle et des phases ainsi que leur enchaînement. Plusieurs approches ont été proposées pour réguler le trafic en fonction de l'état observé par les boucles capteurs ou les campagnes de mesures. Nous classons les approches en quatre familles qui sont présentées brièvement ci-dessous.

1.2.2.1 Régulation semi-adaptative

A partir des mesures de trafic, il est possible de calculer plusieurs plans de feux où chaque plan de feu définit les durées du cycle et des phases. En fonction des variations observées en temps réel ou observées dans le passé, les plans de feux sont amenés à évoluer. Voici quelques techniques :

La programmation horaire

Cette méthode de régulation repose sur des variations régulières à partir de plusieurs plans de feux connus [7]. En effet, le régulateur passe d'un plan de feux à un autre à certains moments de la journée en fonction du niveau quotidien de trafic (estimation). Ainsi, en général, trois plans de feux sont établis (heures de pointe, heures creuses, nuit).

La micro-régulation

La micro-régulation est particulièrement intéressante dans les cas de variations exceptionnelles et aléatoires du trafic [8]. Elle peut également être mise en place pour des débits faibles et moyens. Grâce à l'observation en temps réel des entrées d'une intersection, le

régulateur effectue des modifications sur les phases du plan de feu (occurrence, ordre). La micro-régulation est aussi applicable à un petit groupe d'intersections. Par exemple, nous trouvons la micro-régulation au niveau des insertions de phases de bus ou de phases de voies avec un trafic très faible.

Véhicule actionneur

Le principe du véhicule actionneur peut être utilisé dans deux cas, soit partiellement pour quelques voies particulières d'une intersection, soit totalement sur toutes les voies [9,10]. Dans le cas d'une utilisation partielle, on s'intéresse en particulier aux voies présentant un faible débit. Chacune des voies concernées est équipée en amont d'une boucle électromagnétique de manière à détecter l'arrivée des véhicules. Si aucun véhicule ne se présente, le plan de feu évolue uniquement en fonction des voies ayant un fort débit. Lorsqu'un véhicule est détecté dans une voie à faible débit, le régulateur de l'intersection modifie son plan de feu de manière à donner un temps de vert minimum permettant le passage exceptionnel du véhicule. Si d'autres véhicules arrivent pendant la phase de vert, celle-ci peut être étendue plusieurs fois en fonction du nombre de véhicules (voir Figure 1.6). Cependant, cette phase optionnelle possède une limite temporelle qui, une fois atteinte, redonne la priorité aux voies principales. Les choix sur le temps minimum, le temps maximum ainsi que sur l'unité d'extension de la phase donnent lieu à l'existence de plusieurs versions du système véhicule actionneur. Cependant, en général le temps de vert maximal est défini en fonction de la charge maximale que l'intersection peut subir aux heures de pointe. Ainsi, ce système améliore de manière significative la régulation du trafic d'une intersection dans un contexte d'heure creuse avant d'atteindre sa limite lorsque le trafic devient plus important.

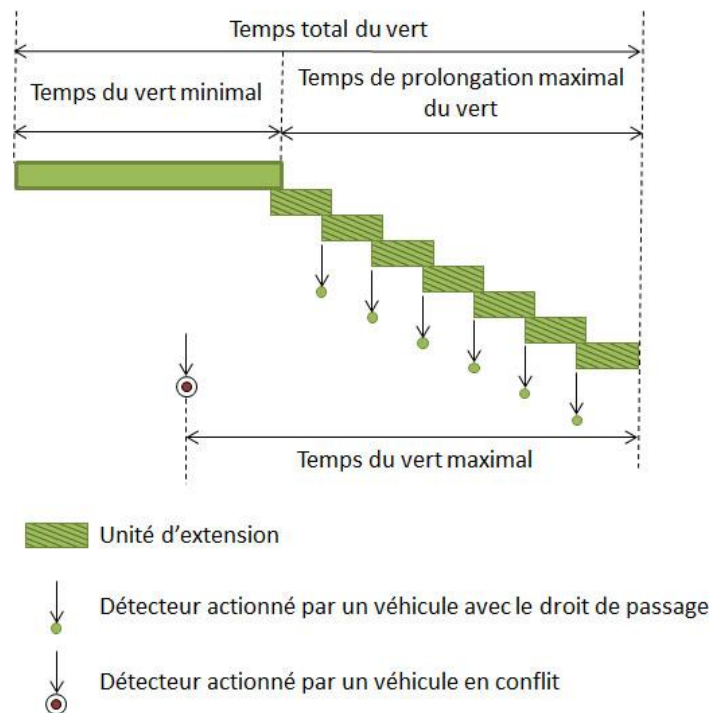


Figure 1.6 - Principe de fonctionnement du véhicule actionneur

Correction du temps de cycle

La méthode de correction du temps de cycle agit directement sur la durée totale de celui-ci en observant les augmentations et les diminutions des débits du trafic [8]. En effet, un temps de cycle court est plus adapté à un faible débit, tandis qu'un temps de cycle long est nécessaire pour supporter un pic de trafic. Il est possible d'allonger la durée du cycle lors de l'augmentation du débit, et inversement. Malheureusement, un débit faible peut correspondre aussi bien à un trafic fluide qu'à un trafic saturé. Une intervention humaine peut donc être nécessaire en cas d'incertitude. Ainsi, en fonction d'un certain seuil de cette baisse et de l'heure de la journée, des agents régulateurs peuvent avoir à valider le nouveau cycle.

1.2.2.2 La macro-régulation

La macro-régulation est utilisée pour réguler un ensemble de plusieurs intersections. Le premier système développé est, à notre connaissance, le modèle TRANSYT [11]. TRANSYT permet de déterminer des temps fixes de cycle pour un réseau d'intersections à partir des débits de trafic connus et en fonction des heures de la journée. Pour améliorer le système existant, les systèmes SCAT [12] et SCOOT [13] ont été proposés pour apporter un fonctionnement en temps réel. SCOOT est basé sur le système TRANSYT, il utilise des temps de cycle fixes dont les phases peuvent subir de petites variations en fonction de la demande. SCAT est capable d'agir sur la durée des phases, mais également sur le temps total des cycles et les décalages de ces derniers. Le programme CLAIRE [14], créé par l'INRETS (Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), actuellement IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) a également contribué à l'amélioration des conditions du trafic. L'avantage de cette méthode est de pouvoir être couplé avec un système de micro-régulation, pour détecter les congestions, fournir des statistiques sur le trafic et recommander des comportements en fonction des axes.

1.2.2.3 Régulateurs adaptatifs à temps discrets

Les régulateurs adaptatifs à temps discrets existent depuis le début des années 80. Au lieu de considérer un système par cycle, ces modèles utilisent une discrétisation temporelle d'un horizon de temps. Cet horizon, généralement constant, est composé d'étapes qui correspondent à des intervalles de temps de quelques secondes. A chaque étape, le régulateur peut choisir, soit de prolonger la phase actuelle, soit de passer à une nouvelle phase (voir Figure 1.7). Le processus d'optimisation s'effectue au fur et à mesure de l'enchaînement des étapes de l'horizon. Cependant, les décisions ne sont pas appliquées à toutes les étapes qui sont regroupées sous forme d'étages. Le régulateur met donc en œuvre son choix étage par étage de manière à considérer à la fois les véhicules présents dans l'intersection, et l'estimation du trafic à venir.

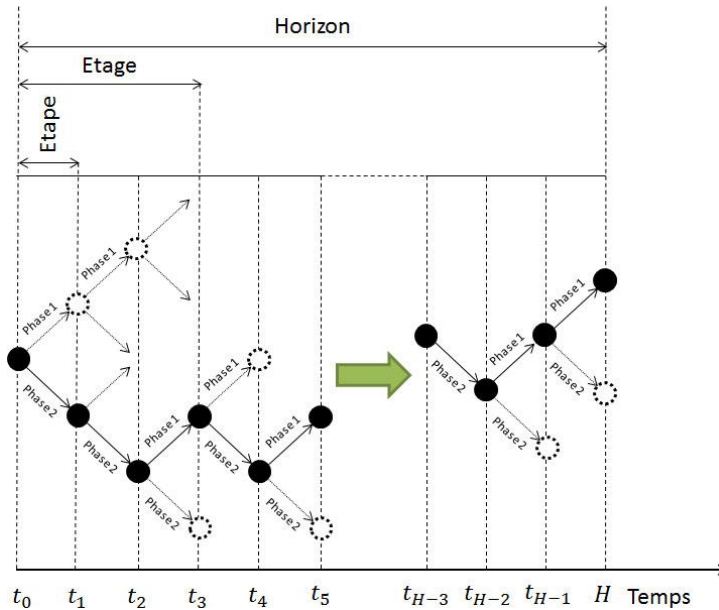


Figure 1.7 - Discrétisation temporelle d'un horizon de temps

Chaque régulateur se caractérise par sa méthode d'optimisation, qui se base sur un critère particulier, généralement le retard. Ce critère peut être évalué de différentes manières. Il existe également plusieurs approches possibles pour mesurer le trafic actuel et pour estimer le trafic futur. Les méthodes appliquées par un régulateur peuvent être coûteuses en termes de temps de calcul. Quelques approches tentent d'approcher la solution optimale rapidement, mais la plupart des régulateurs utilisent des méthodes exactes qui cherchent la solution optimale.

On peut retenir quelques exemples :

- OPAC (Optimization Policies for Adaptive Control) [15],
- PRODYN [16],
- CRONOS (ContrROI of Networks by Optimisation of Switchovers) [17],
- RHODES [18,19,20],
- UTOPIA (Urban Traffic OPTimization by Integrated Automation) [21].

1.2.2.4 Régulation stocker et transférer

Stocker et transférer considère la même durée du cycle sur l'ensemble des intersections. Grâce à cette simplification, la régulation stocker et transférer est capable de contrôler un réseau d'intersections à l'échelle d'une ville [22]. La méthode est basée sur le concept de cycle (régulation classique), tout en utilisant une discrétisation temporelle (régulation adaptative). Chaque cycle représente une étape, qui utilise les observations du cycle précédent pour effectuer sa prise de décision. L'objectif est de calculer des temps de vert suffisants pour éviter que la phase ne soit saturée, en évaluant l'occupation des zones de stockage. La détermination des temps nécessaires est effectuée grâce à une fonction objectif de forme quadratique.

Il est important de noter que cette méthode permet uniquement de définir la durée des verts. Il est ensuite nécessaire d'appliquer un algorithme de synchronisation [23,24]. De plus, la

simplification du problème entraîne quelques inconvénients. Puisque la discrétisation temporelle est à l'échelle du cycle, l'observation des phénomènes locaux est limitée. Les oscillations des files d'attente ne sont donc pas considérées, ce qui signifie que le déclenchement d'une phase n'est pas nécessairement au bon moment, malgré une bonne estimation du temps de vert.

1.2.3 Discussion

Les différentes techniques de variations des temps de cycle et des phases ainsi que de calcul de succession des phases et la synchronisation des feux ont contribué largement à la fluidification du trafic. Cependant, les feux tricolores posent aujourd'hui plusieurs problèmes liés au manque de flexibilité [25] et de précision que nous soulevons comme suit :

1. Découpage en phases :

- La diversité d'architecture des intersections nécessite l'étude de chaque cas pour définir un découpage en phases. En effet il existe une multitude de possibilités de voies d'entrées et de mouvements disponibles, et donc de points de conflit. La complexité augmente notamment avec le partage avec des voies dédiées aux bus ou encore aux tramways. Comme il a été cité précédemment, une fois le découpage en phases décidé, il est difficile de l'adapter à la situation observée. Ceci conduit, dans plusieurs cas réels, à interdire certains mouvements de tourne-à-gauche augmentant ainsi les distances parcourues des véhicules,
- Du point de vue de la sécurité, les feux tricolores ne permettent pas de contrôler tous les points de conflits. En effet, pour des raisons d'efficacité, une phase comporte souvent au moins un point conflictuel, en particulier le tourne-à-gauche pose souvent problème.

2. Mesures de la demande du trafic :

- Les mesures de débit ne permettent pas d'obtenir avec précision l'état présent du trafic. D'une part, pour le même débit le trafic peut être fluide ou congestionné. D'autre part, la mesure du débit nous renseigne seulement sur le débit de la période de mesure qui vient de se terminer,
- La capacité des voies dépend particulièrement des périodes utilisées pour mesurer les débits. Il est ainsi difficile de déduire la capacité avec précision ainsi que les pics de la demande du trafic. Les calculs réalisés sont dépendants de la discrétisation temporelle.

3. Système de signalisation :

- Il est également important de signaler les limites de la signalisation. En effet une couleur s'affiche pour tous les utilisateurs d'une voie. Ainsi l'autorisation de passer s'applique même au dernier véhicule de la file. En réalité, il n'y a aucune certitude sur le passage effectif de chaque véhicule. Par exemple, au moment de la transition du feu vert vers le feu orange, la réaction du conducteur est imprévisible, certains vont s'arrêter, tandis que d'autres vont accélérer. Sur la Figure 1.8 par exemple, il est impossible de prédire si le troisième véhicule et le quatrième véhicule vont passer. Il n'est donc pas possible de contrôler précisément le nombre de véhicules qui passent pendant une phase. Or, ce phénomène est responsable de

dépassement de files, c'est-à-dire que certains véhicules peuvent se trouver à l'arrêt au milieu de la zone de conflit. Ce qui a pour conséquence, non seulement de bloquer les autres mouvements, mais également de provoquer de nouveaux dépassements de files pouvant mener à terme à un interblocage (voir Figure 1.9) du réseau d'intersections.

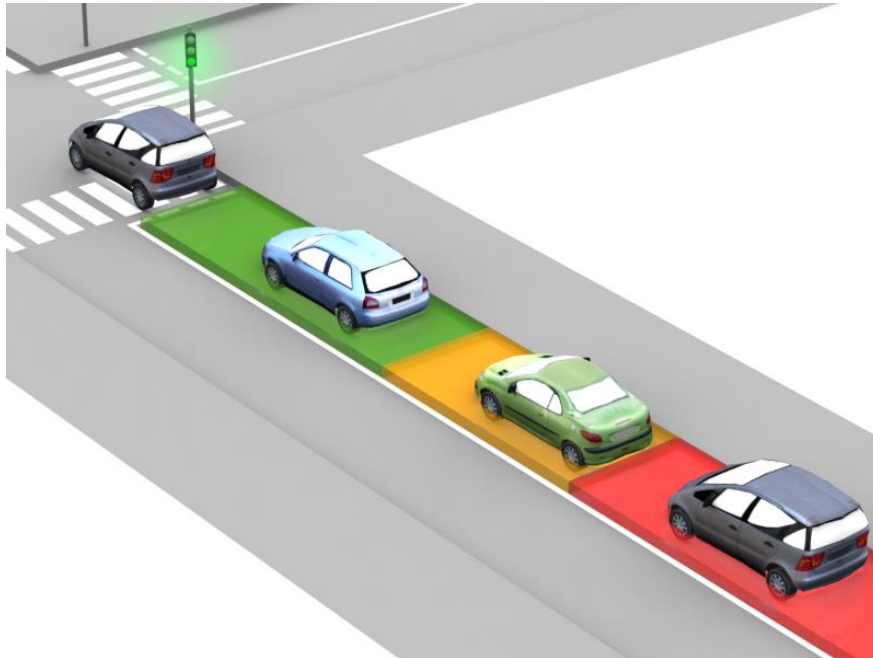


Figure 1.8 - Exemple de passage d'une file de voitures au cours d'une phase

L'augmentation du nombre de véhicules et de la complexité du partage des ressources pousse donc à se tourner vers les nouvelles technologies. Celles-ci permettent de voir le problème sous un nouvel angle avec la possibilité de considérer un véhicule de manière individuel tout en offrant un système de signalisation sans feux tricolores fixes.

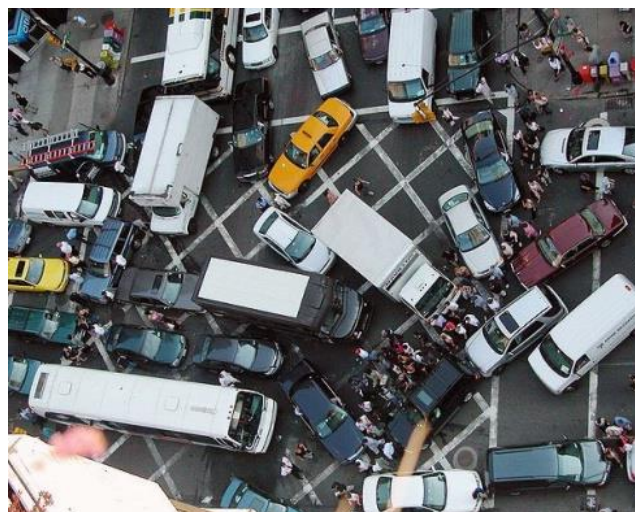


Figure 1.9 - Exemple de situation d'interblocage liée au dépassement de files

1.3 Régulation émergente du trafic

Depuis le début du vingtième siècle, la technologie n'a cessé d'évoluer permettant d'imaginer de nombreux systèmes capables d'améliorer le trafic, en particulier grâce à la technologie embarquée. En effet, depuis quelques années, l'idée du véhicule partiellement, ou entièrement contrôlé devient une réalité, offrant de nouvelles perspectives de régulation du trafic.

Récemment quelques travaux intéressants ont proposé des approches inédites de régulation coopérative. Ces méthodes semblent très prometteuses, cependant de nombreuses contraintes se présentent et nécessitent une investigation poussée, notamment à travers des tests à échelle réelle.

De manière générale l'étude des systèmes d'aide à la conduite et de la régulation coopérative du trafic est regroupée dans la dénomination **ITS** (Intelligent Transportation Systems).

1.3.1 Véhicule émergent

Ces dernières années, des développements notables dans les **systèmes de positionnement** et dans les **systèmes de communication sans-fil** ont amené au développement de nombreux **systèmes d'aide à la conduite**. Récemment des prototypes de véhicules entièrement contrôlés ont même été développés et testés.

1.3.1.1 Systèmes de positionnement

Il est possible de séparer les systèmes de positionnement en deux catégories. Le positionnement de type **absolu** permettant à un objet de se situer par rapport à un repère global de l'environnement et le positionnement de type **relatif** dépendant de la position d'un ou plusieurs autres objets.

Positionnement absolu

Le système de positionnement par satellites appelé **GNSS** (Global Navigation Satellite System) [26] est principalement constitué de plusieurs constellations de satellites qui dépendent de plusieurs pays. Les Etats-Unis ont initié le projet avec la mise en place dans les années 70 du système **GPS** (Global Positioning System) [27], constitué actuellement de 24 satellites opérationnels. Aujourd'hui, la Russie possède son propre programme nommé **GLONASS** (GLObal NAVigation Satellite System) [28], constitué lui aussi de 24 satellites opérationnels. L'Europe, la Chine et l'Inde sont également en train de développer leurs systèmes nommés respectivement **Galileo** [29], **COMPASS** et **IRNSS** (Indian Regional Navigation Satellite System). L'ensemble des satellites du GNSS forment ainsi une couverture autour de la planète permettant d'obtenir la position d'un objet à sa surface (ou dans le ciel), depuis n'importe quel endroit. Un récepteur doit capter au moins 3 satellites pour être capable de calculer sa position. Un des principaux avantages de ce système est sa disponibilité pour le grand public. En effet, le domaine militaire, l'aviation et le transport maritime sont prioritaires sur l'utilisation de tels systèmes, bénéficiant ainsi de l'accès à une meilleure précision.

L'inconvénient majeur du système GNSS repose sur son imprécision. En effet, l'erreur calculée peut être seulement de quelques mètres, jusqu'à plusieurs dizaines de mètres, en

particulier en milieu urbain à cause de l'effet de réverbération des ondes sur les bâtiments. Le signal d'un satellite peut également être dégradé lors de la traversée atmosphérique. Or, une erreur au-delà du mètre n'est souvent pas acceptable pour le positionnement d'entités mobiles à cause du risque de collision, notamment dans le cadre de la régulation d'une intersection.

Heureusement, la technologie de positionnement par satellites peut être améliorée en la couplant avec d'autres systèmes pour atteindre une précision centimétrique dans les meilleurs cas. La cinématique temps réel appelée **RTK** (Real Time Kinematic) [30,31] permet à une station de référence d'envoyer des corrections basées sur l'utilisation de mesures de phase des ondes porteuses des signaux des satellites. Le principe **DGPS** (Differential GPS) [32] repose sur le principe de l'installation d'un réseau de stations fixes, qui servent de références pour détecter les différences entre la position mesurée d'un satellite et sa position réelle connue. Les erreurs ainsi connues peuvent être communiquées pour corriger le calcul de la position du récepteur. Les programmes **EGNOS** (European Geostationary Navigation Overlay Service) [33] et **WAAS** (Wide Area Augmentation System) [34] sont des exemples d'utilisation du principe DGPS. En général, les systèmes de navigation par satellites utilisent également des données cartographiques, de manière à affiner la position par rapport aux routes existantes [35].

Positionnement relatif

En complément de ce positionnement absolu, il est possible d'utiliser des systèmes de positionnement relatif qui peuvent être installés sur les véhicules ou au niveau de la chaussée. Parmi eux, on peut retenir l'**odométrie**, le **Radar**, le **LIDAR**, le **capteur vidéo**, le système **RFID** (Radio-Frequency Identification) ou encore le **gyroscope** et l'**accéléromètre**. Les systèmes de type Radar ou LIDAR (Light Detection And Ranging) permettent de détecter les objets, voire d'analyser leur forme grâce à un balayage [36]. L'odométrie permet au véhicule de connaître sa distance parcourue grâce à la mesure des tours de roues effectués. La technologie RFID est composée de lecteurs et d'étiquettes qui peuvent être utilisés dans le transport [37]. Il est possible de placer les étiquettes sur l'infrastructure (marqueurs de position), le véhicule équipé du lecteur peut ainsi connaître sa position relative en détectant celles-ci. C'est le cas par exemple dans le système ERTMS (European Rail Traffic Management System) utilisé par les trains [38]. Il est également possible de placer les étiquettes sur les véhicules, le lecteur se trouve alors au niveau de l'infrastructure. Le capteur vidéo apporte un intérêt grandissant ces dernières années avec l'augmentation de la qualité et de la vitesse de capture des images. Il peut être placé sur un point fixe pour détecter et suivre les objets mobiles (en particulier grâce à la stéréovision) [39], ainsi qu'aider à réguler le trafic aux intersections [40], ou être installé directement sur un véhicule en mouvement pour détecter et reconnaître les obstacles [41,42]. Un gyroscope permet de mesurer les rotations d'un objet, tandis qu'un accéléromètre peut détecter les mouvements dans toutes les directions. Tous ces capteurs peuvent être utilisés ensemble pour affiner le positionnement d'un véhicule [43].

1.3.1.2 Systèmes de communication sans-fil

Aujourd'hui, il existe de nombreux protocoles de communication sans-fil tels que le **GPRS** (General Packet Radio Service), le **GSM** (Global System for Mobile Communications), le **Wi-Fi**, le **WiMax** (Worldwide Interoperability for Microwave Access), la **3G**, la **4G**, le **Zigbee**, le **Bluetooth**, la **G5** (IEEE 802.11p), etc. La technologie RFID présentée précédemment dans les systèmes de positionnement est également un système de communication à courte portée. Tous ces moyens de communication sont utilisés dans différents domaines pour diffuser une quantité d'informations de plus en plus grande et de plus en plus rapidement. Des applications existent déjà dans le domaine du transport, en particulier pour contrôler le respect des horaires dans les réseaux de bus, de tramways, d'avions, de trains, etc. Ces dernières années, un effort particulier a été mené sur le développement des communications à courte et moyenne portée dédiées exclusivement aux ITS. Ces communications, pouvant être à sens unique ou à double sens, sont regroupées dans l'appellation **DSRC** (Dedicated Short-Range Communications) [44,45,46,47].

Les communications DSRC sont principalement utilisées dans le but d'augmenter la sécurité des routes et de ses usagers, grâce à la diffusion de messages informatifs concernant l'état de la route et la situation des autres usagers [48,49]. Il peut également être mis en place pour un objectif de divertissement avec l'accès dans le véhicule à internet, la téléphonie ou encore des informations sur la disponibilité des places de parkings. Le dernier domaine d'application qui ouvre de nouvelles perspectives, vise à gérer le trafic en réduisant les embouteillages et les risques d'accident, tout en diminuant la durée des trajets, la consommation, et par conséquent la pollution. Les péages automatiques sur les autoroutes (télépéage) sont par exemple équipés de cette technologie [50,51].

La standardisation des communications DSRC est primordiale pour permettre une utilisation par les différents acteurs qui cherchent à améliorer les services qui touchent au trafic [52]. Des standards ont été proposés aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, ils sont basés sur le standard IEEE 802.11. Aux Etats-Unis, la dernière définition a été publiée en 2006 par la FCC (Federal Communications Commission) [53]. La bande de fréquence allouée est de 5.9GHz pour une bande passante de 75MHz. En Europe, les standards ont été définis par le CEN (Comité Européen de Normalisation) pour la bande de fréquence 5.9GHz, avec une bande passante de 20MHz. Au Japon, la bande de fréquence 5.8GHz a été choisie par l'association ARIB (Association of Radio Industries and Businesses) avec une bande passante de 80MHz.

Grâce à la technologie DSRC, la recherche s'est portée sur le développement des réseaux **VANET** (Vehicular Ad Hoc Network) [54,55]. Un réseau VANET est une forme de réseau **MANET** (Mobile Ad Hoc Network) [56,57,58] qui est spécialisé dans le trafic. Ces réseaux permettent de gérer la transmission des informations au sein d'un groupe de nœuds (entités mobiles ou fixes). Dans le cas des VANET, les entités mobiles sont des véhicules, tandis que les entités fixes sont des équipements de communication placés au niveau de l'infrastructure (le long des routes, au niveau des intersections). Chaque nœud est donc considéré comme un routeur sans-fil capable de communiquer avec les autres nœuds se trouvant à courte et moyenne distance. On peut distinguer deux modes de communication qui peuvent être utilisés indépendamment, ou ensemble, il s'agit du mode véhicule-véhicule (**V2V**) et du mode

véhicule-infrastructure (**V2I**). Un réseau VANET propose donc un problème légèrement différent d'un réseau MANET puisque les véhicules en mouvement sont limités dans leurs déplacements par rapport à l'infrastructure. Les protocoles MANET ne peuvent pas être appliqués directement pour les réseaux de type VANET.

Le développement des réseaux VANET s'intéresse à un certain nombre de contraintes, qui sont plus rares dans les réseaux sans-fil classiques et qui dépendent du type d'application. Avant de résoudre les problèmes liés à la transmission d'un message d'un bout à l'autre d'un réseau, il faut prendre en compte la dégradation du signal, qui survient à cause de la vitesse des véhicules (130km/h sur l'autoroute), mais également à cause de l'infrastructure qui peut comporter notamment des bâtiments en milieu urbain [59]. Ensuite, au niveau du réseau, la mobilité des entités connectées peut engendrer des changements très rapides sur l'existence des connections entre elles. De plus, la densité variable des nœuds (en particulier dans le cas de la formation de petits groupes de véhicules sur l'autoroute), peut rendre impossible l'existence d'un chemin de transmission des messages dans le réseau. L'existence des redondances d'informations sont aussi à prendre en compte. Il est donc indispensable de définir une stratégie solide de distribution des messages en fonction des besoins. Un dernier point très important considère la sécurité [60]. En effet, comme dans n'importe quel réseau, on pourrait assister au phénomène d'usurpation d'identité, ou encore à l'envoi de données volontairement erronées, qui visent à induire en erreur les autres systèmes.

1.3.1.3 Systèmes d'aide à la conduite

Les systèmes d'aide à la conduite, regroupés dans la dénomination ADAS (Advanced Driver Assistance System), permettent initialement d'améliorer la sécurité d'un véhicule de manière active, en utilisant des technologies de communication et/ou de positionnement [61,62]. L'objectif futur est d'équiper petit à petit tous les véhicules avec ces systèmes, de manière à augmenter la sécurité de manière globale, mais également à réduire les problèmes de congestion, notamment en ville. Certains systèmes alertent simplement le conducteur des dangers ou fournissent des informations utiles, tandis que d'autres ont la capacité de prendre tout ou partie du contrôle du véhicule.

Aide à la navigation

Le système d'aide à la navigation est basé sur le GNSS présenté précédemment. Il sert à calculer un trajet en fonction de plusieurs paramètres de manière à guider un véhicule le long de celui-ci. Plusieurs approches d'algorithmes permettent de calculer un trajet en fonction de différents critères tels que le temps de trajet ou encore sa longueur, en utilisant des données cartographiques [63,35]. Grâce à la méthode d'info-traffic, un récepteur GPS est également capable de tenir compte des volumes de trafic estimés à partir de mesures, entre le départ du véhicule et sa destination. La localisation en temps réel peut également servir à centraliser la surveillance et la gestion d'une flotte de véhicules.

Régulateur de vitesse

Le régulateur de vitesse, connu sous le nom **CC** (Cruise Control), a été installé dans les premières voitures dans les années 1958 grâce à l'ingénieur Ralph Teetor. Le système permet de maintenir le véhicule à une vitesse constante grâce à un contrôle sur l'accélération.

Régulateur de vitesse adaptatif

Le système **ACC** (Adaptive Cruise Control) [64,65] est capable de faire varier la vitesse du véhicule en fonction du véhicule qui précède, grâce à l'utilisation d'un système de radar frontal. Il s'agit d'une amélioration du système CC. Plusieurs modèles de voitures sont déjà équipés d'ACC.

Aide à la navigation avancée

L'aide à la navigation est largement répandue dans le monde aussi bien pour des besoins personnels que professionnels. Cependant, de nombreux travaux tentent encore d'améliorer le système en fournissant des algorithmes de calcul plus rapides et plus précis, capables en particulier de corriger les erreurs de positionnement grâce à l'ajout de capteurs. Certaines études s'intéressent à l'utilisation du gyroscope [66] tandis que d'autres ont recours à un capteur vidéo capable d'analyser l'environnement [67].

Régulateur de vitesse adaptatif coopératif (Guidage longitudinal)

La dernière amélioration du système ACC est appelée **CACC** (Cooperative Adaptive Cruise Control) [68,69]. Elle peut par exemple être basée sur l'ajout de la communication sans-fil pour communiquer avec le ou les véhicules qui précèdent, en complément du radar, mais également d'un capteur vidéo ou d'autres systèmes présentés précédemment. L'objectif est de créer des convois de véhicules dont seul le premier véhicule de la file est conduit par un humain, tandis que les autres véhicules tentent de rester à une distance faible et constante de leur prédécesseur [70,71]. Ce qui nous intéresse dans ce mémoire est la possibilité d'utiliser le système CACC au niveau d'une intersection. Les véhicules peuvent ainsi adapter leur vitesse non seulement par rapport aux véhicules dans la même voie, mais également en tenant compte des véhicules dans les mouvements conflictuels.

Contrôle de trajectoire (Guidage latéral)

Le contrôle de trajectoire est un guidage de type latéral qui agit directement sur la direction du véhicule. Comme pour les autres systèmes tel que le guidage longitudinal, le système doit traiter en temps réel les informations qui proviennent des capteurs de manière à ensuite appliquer une action sur le véhicule. Cependant, contrairement au guidage longitudinal, la connaissance de la position du véhicule n'est pas suffisante dans un contexte latéral. En effet il est également indispensable de suivre l'orientation par rapport à l'environnement.

Les méthodes de guidage peuvent varier en fonction du type d'environnement observable. On peut distinguer plusieurs cas principaux. Dans le cas d'un espace ouvert sans obstacle, l'utilisation d'un capteur GPS couplé à un gyroscope peut suffire puisque le risque de

collision est nul tant que le véhicule reste à quelques mètres de sécurité à l'intérieur de la zone sécurisée. Dans le cas d'une route, un véhicule peut se baser sur plusieurs types d'information pour garder une bonne trajectoire. Des travaux proposent d'utiliser un capteur vidéo pour reconnaître et suivre une route [72]. D'autres recherches s'intéressent à la détection d'un véhicule à suivre de manière à appliquer la même trajectoire [73]. L'utilisation de la stéréovision grâce à un double capteur vidéo est particulièrement intéressante grâce à sa capacité à détecter la profondeur du champ de vision [74]. Dans le cas où aucun véhicule ne peut être suivi, et où la route ne comporte pas de marquage au sol, dans [43,75] par exemple les auteurs proposent une méthode qui fusionne les données de plusieurs capteurs.

1.3.1.4 Véhicule entièrement contrôlé

La mise en place des ADAS offre le potentiel du véhicule entièrement contrôlé (sans intervention humaine) [76]. Ces dernières années, une compétition notable nommée "DARPA Grand Challenge", organisée par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency), a permis de motiver les recherches dans le domaine [77]. En 2004 et 2005, les véhicules avaient pour objectif de se diriger sur un circuit dans le désert, tandis qu'en 2007, les véhicules évoluaient en milieu urbain comportant des intersections à "stop".

De nombreux groupes proposent déjà des prototypes de véhicules entièrement contrôlés (Mercedes-Benz, Nissan, Toyota, Audi, Volvo, Google, VisLab, etc.). La voiture appelée "Google Car" a par exemple été particulièrement médiatisée [78].

Cependant la mise en circulation de tels véhicules nécessite une adaptation des lois. Ainsi aux Etats-Unis, la NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) a défini une classification officielle à cinq niveaux du contrôle du véhicule :

- Niveau 0 : Le conducteur a le contrôle total de son véhicule,
- Niveau 1 : Le véhicule peut contrôler certains systèmes tels que le freinage d'urgence,
- Niveau 2 : Au moins deux systèmes peuvent être actifs en même temps, comme un ACC et un système d'alerte de franchissement des lignes blanches,
- Niveau 3 : Le véhicule possède le contrôle total dans la limite du possible, et rend le contrôle au conducteur si nécessaire,
- Niveau 4 : Le véhicule est capable d'effectuer un trajet complet sans intervention humaine, incluant donc la possibilité de véhicule inoccupé.

Aux Etats-Unis, depuis 2011, plusieurs Etats (Nevada, Floride, Californie, Colorado, Michigan) ont défini une loi pour autoriser la circulation des véhicules contrôlés. Cependant un conducteur doit être présent derrière le volant en permanence pour reprendre le contrôle du véhicule à tout moment. Au Royaume-Uni, le gouvernement souhaite effectuer une période de test sur la voie publique avant d'envisager une réadaptation du code de la route et une modification de la loi pour considérer les véhicules contrôlés. En Chine, des essais sont déjà en cours sur les voies rapides. En Europe, la Suède souhaite commencer des tests en 2017, tandis que la France compte commencer en 2015, mais uniquement sur circuits.

Plusieurs projets s'intéressent à la commercialisation de véhicules entièrement autonomes pour le transport de passagers dans les centres villes, les aéroports ou encore les parcs [79].

En général ces véhicules sont limités par une vitesse d'environ 20 km/h et sont capables de se diriger facilement dans un environnement urbain grâce à un système d'observation à 360 degrés.

Un effort important reste à fournir dans le développement du véhicule entièrement contrôlé, aussi bien du point de vue de la loi, que du point de vue technique [80]. En effet, aucune collision due à la défaillance d'un des systèmes du véhicule n'est acceptable. De plus, une vitesse limite de 20 km/h reste trop faible pour espérer réduire la congestion de manière significative.

1.3.2 Régulation coopérative d'une intersection isolée

La régulation coopérative d'intersection repose sur une nouvelle infrastructure, mais également sur une nouvelle manière de réguler les véhicules. On utilise le terme général MCI (Management Coopératif d'Intersection) pour désigner l'ensemble infrastructure / régulateur. Le MCI permet de couvrir de nombreux systèmes. Il ne s'agit pas d'un système avancé de feux tricolores [81,82,83,84,85], ni d'un système coopératif d'évitement de collision [86,48,87]. En effet le MCI a pour but d'apporter une solution capable de considérer chaque véhicule de manière individuelle grâce à l'utilisation des systèmes de positionnement et des systèmes de communication sans-fil présentés précédemment et qui permettent la création des ADAS. Le principe de base est la négociation du droit de passage qui peut se faire de différentes manières.

Un MCI complet doit être décrit selon une **architecture de communication**, un **protocole de régulation** ainsi qu'une **politique de régulation** qui doivent s'adapter à un certain nombre de contraintes. L'architecture de communication a pour but de définir le matériel utilisé ainsi que les interactions possibles entre les différentes entités (mobiles ou fixes). Le protocole est basé sur l'architecture de communication, il fixe les règles de base qui garantissent le bon fonctionnement de la régulation, notamment d'un point de vue de la sécurité. La politique de régulation utilise les avantages du protocole pour tenter d'améliorer la fluidité de l'intersection.

1.3.2.1 Contraintes

L'étude d'un MCI doit passer par la prise en compte de plusieurs contraintes. Dans un premier temps, il est indispensable de penser au problème comme un phénomène discret (séquence de passage des véhicules), alors que le mouvement des véhicules est un phénomène continu. Ensuite, à partir du principe de système discret, il faut traiter des **contraintes "temps-réel"** ainsi que des **contraintes physiques**. Il est important de souligner qu'aucun travail sur les MCI ne peut résoudre le problème en une seule fois. En effet, dans la littérature la plupart de ces contraintes sont souvent ignorées dans un premier temps avant de traiter celles-ci graduellement. De plus la gestion de ces contraintes relève toujours d'un compromis entre efficacité et sécurité.

Contraintes "temps-réel"

Les contraintes dites "temps-réel" concernent la prise en compte des délais de tous les systèmes, de manière à rendre transparent le caractère discret du problème, pour s'appliquer

au problème continu, notamment d'un point de vue de la sécurité. En effet, on peut considérer principalement quatre exemples de systèmes présentant ces contraintes :

- Les systèmes de communication : les messages nécessitent forcément un délai pour arriver au destinataire,
- Les capteurs (positionnement, détection d'obstacle, etc.) : la lecture des données n'est pas instantanée, les valeurs présentent donc un retard par rapport à la réalité,
- Les systèmes de calcul : le calcul d'une décision peut prendre un certain temps, surtout dans le cas d'un processus d'optimisation où de nombreuses données sont à prendre en compte,
- Les systèmes de contrôle : une fois une décision prise par le contrôleur d'un véhicule (accélérer, freiner, etc.), un délai est nécessaire avant l'application réelle.

Contraintes physiques

Les contraintes physiques concernent la précision des systèmes. Les deux principaux exemples sont :

- Les capteurs (positionnement, détection d'obstacle, etc.) : il faut considérer toutes les erreurs liées aux capteurs, par exemple un capteur GPS peut présenter des erreurs de plusieurs mètres,
- Les systèmes de contrôle : le contrôleur d'un véhicule doit être suffisamment précis pour permettre d'appliquer la vitesse et/ou la trajectoire souhaitée.

De manière générale, à terme, il est indispensable dans l'élaboration d'un MCI, de considérer tous les problèmes techniques possibles tels que les pannes des systèmes, crevaisons de pneus, etc. Certains travaux considèrent également les conditions climatiques, notamment par rapport au problème d'adhérence des véhicules [88,89].

1.3.2.2 Architecture de communication

L'architecture de communication permet de définir le matériel utilisé pour pouvoir échanger des messages entre des entités. Il est également nécessaire de créer des protocoles de communication adaptés, notamment d'un point de vue de la sécurité. Par exemple il est possible de mettre en place un système de cryptage / décryptage des messages dans le but notamment d'empêcher l'usurpation d'identité. On peut distinguer deux principales classes d'architecture de communication, les **architectures centralisées** et les **architectures décentralisées** qui se distinguent par l'utilisation ou non d'un **serveur d'intersection**, aussi appelé **contrôleur d'intersection**. Il est également possible de définir des **architectures semi-centralisées**.

Architecture décentralisée

L'idée d'un protocole décentralisé vient de Naumann [90]. L'auteur propose de réguler l'intersection sans serveur d'intersection. D'autres auteurs se sont intéressés à cette architecture [91,92,93,94]. Les véhicules en approche de la zone de conflit doivent négocier entre eux l'accès grâce au mode de communication V2V (voir Figure 1.10). Chaque véhicule

doit donc collecter des informations directement des autres véhicules, tout en émettant des données concernant sa propre situation. Le principal avantage de cette architecture est la simplicité de mise en place puisqu'une fois les véhicules équipés des systèmes adéquats, ils sont capables de négocier l'accès au niveau de n'importe quelle intersection.

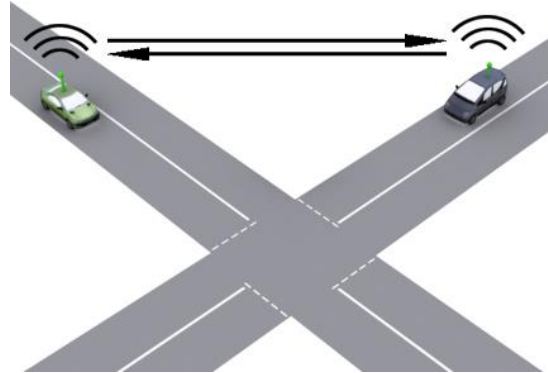


Figure 1.10 - Architecture décentralisée

Du point de vue de la sécurité, les auteurs avancent qu'aucune collision ne peut se produire. Cependant les approches décentralisées ignorent bien souvent les problèmes majeurs de communication. Par exemple, le contrôleur d'un véhicule qui ne peut pas obtenir les informations d'un ou plusieurs véhicules considère être prioritaire, et traverse donc l'intersection avec toutes les chances de collision. Des tests avec des mini-robots ont permis de montrer les limites de l'architecture décentralisée [95]. En effet plusieurs collisions ont eu lieu, à cause de la saturation de la bande passante du système de communication. Pour améliorer la sécurité, il est donc nécessaire d'ajouter des capteurs, soit au niveau des véhicules, soit au niveau de l'intersection. Dans le cas d'un ajout de capteurs au niveau d'un véhicule, tel qu'un capteur optique par exemple, d'autres obstacles peuvent se présenter comme des immeubles pouvant cacher d'autres véhicules. L'ajout de capteurs au niveau de l'intersection semble donc la seule solution pour permettre de contrôler la présence de l'ensemble des véhicules. Cependant on perd l'intérêt de l'architecture décentralisée. Dans la littérature, il est donc généralement admis que l'architecture décentralisée n'est pas assez fiable.

Architecture centralisée

Contrairement à l'architecture décentralisée qui laisse les véhicules effectuer la négociation entre eux, l'architecture centralisée possède un contrôleur d'intersection permettant de surveiller les entrées / sorties des véhicules, mais également d'appliquer une politique de régulation [96,97,98,99,100,101,102,103,104,105] (voir Figure 1.11). L'architecture est donc basée sur la communication de type V2I.

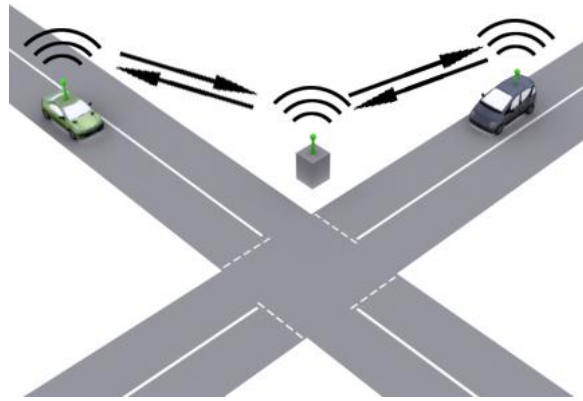


Figure 1.11 - Architecture centralisée

Dans [104,105], des tests avec des mini-robots ont permis de mettre en évidence l'intérêt d'un serveur central par lequel doit obligatoirement passer toute requête de passage. En effet, il offre la possibilité de considérer qu'un véhicule a par défaut l'interdiction de traverser l'intersection. Ainsi, une panne d'un des systèmes de communication engendre le blocage total de l'intersection, tandis que des délais de communication réduisent simplement le débit d'évacuation des véhicules. Le risque de collision étant écarté, le déblocage de l'intersection et l'amélioration des délais est ensuite à traiter dans la définition du protocole de régulation.

Architecture semi-centralisée

A partir d'une architecture centralisée, il est toujours possible que les véhicules communiquent entre eux (voir Figure 1.12). Par exemple, un premier véhicule peut négocier le droit de passage avec le serveur d'intersection, tandis qu'un deuxième véhicule va contacter le premier véhicule, qui sert alors d'intermédiaire. A notre connaissance, une régulation basée sur une telle architecture n'a pas encore été proposée. En effet, l'utilisation simultanée des deux modes de communication (V2I, V2V) rend plus complexe la définition d'un protocole de régulation. De plus, la transmission d'un message à travers plusieurs intermédiaires pose de nombreux problèmes, étudiés dans les réseaux MANET. Il est également important de noter qu'une architecture semi-centralisée doit être principalement basée sur l'utilisation d'un serveur. Ainsi, comme pour l'architecture centralisée, le serveur d'intersection reste le seul responsable de la sécurité de l'intersection, ce qui signifie qu'il possède à tout moment la liste des véhicules présents et ceux autorisés.

Aujourd'hui, la standardisation des unités ITS [106] permet l'étude du type d'architecture semi-centralisée. Cependant, il est nécessaire de définir des protocoles de régulation qui pourront à travers des tests réels, d'une part montrer la faisabilité en termes de sécurité, et d'autre part prouver la possibilité d'améliorer l'intersection.

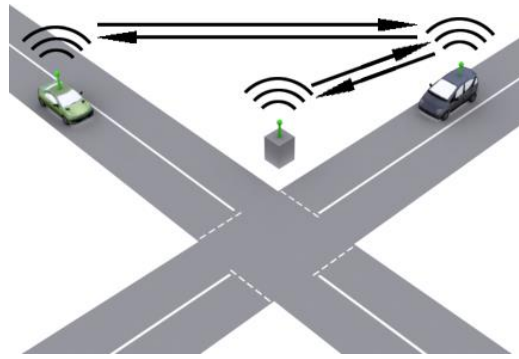


Figure 1.12 - Architecture semi-centralisée

1.3.2.3 Protocole de régulation centralisé

Un protocole de régulation est créé à partir de l'architecture de communication. Il permet de définir la forme du droit de passage, ainsi que les règles qui décrivent la manière dont celui-ci est négocié et attribué. Considérant que l'architecture décentralisée n'est pas assez sécurisée, on s'intéresse maintenant uniquement aux protocoles centralisés. Dans la littérature on peut trouver de nombreux protocoles, cependant il est possible d'identifier trois concepts principaux qui possèdent ensuite différentes variantes. Ainsi, on s'intéresse au **protocole de réservation**, au **protocole du régulateur coopératif de vitesse pour les intersections**, et au **protocole de séquence**.

Protocole de réservation

Le principe de la réservation a été décrit pour la première fois dans [96], il a ensuite été amélioré dans plusieurs travaux [97,98,99,100,101,103]. Toute requête de passage doit obligatoirement être acceptée par le contrôleur central (voir Figure 1.13). Dans ce type de protocole, une requête est une proposition de **réservation d'un espace / temps** qui est soit acceptée, soit refusée par le serveur. L'efficacité du protocole repose sur l'idée qu'un véhicule entièrement contrôlé est capable de respecter une réservation de manière à passer le moins de temps possible dans l'intersection. La zone de conflit est discrétisée sous forme d'un quadrillage de petites zones de conflit avec une certaine granularité de manière à augmenter la flexibilité de la réservation dans l'espace.

Dans l'exemple Figure 1.13, la partie A de l'image décrit les réservations proposées pour un moment donné par les deux véhicules. En partant du principe que le véhicule de gauche obtient sa réservation, la réservation du véhicule de droite est en conflit, cette dernière est donc rejetée. Dans la partie B de l'image, le véhicule de droite ralenti jusqu'à proposer une réservation valide.

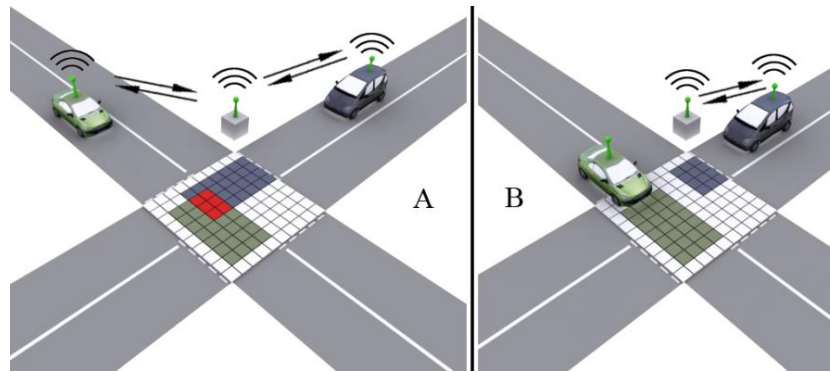


Figure 1.13 - Protocole de réservation

Ce protocole a montré en simulations des résultats qui surpassent largement les feux tricolores. Cependant, les simulations ne considèrent pas les problèmes de communication tels que les délais, et supposent des véhicules capables de respecter précisément une réservation. Or, les tests réels présentés dans [107,105] ont pu mettre en évidence plusieurs difficultés :

- Un véhicule entièrement contrôlé n'est pas aussi précis que prévu. Ainsi le manque de ponctualité nécessite l'ajout de marges de sécurité. Malheureusement une marge de sécurité augmente la distance entre les véhicules, ce qui par la suite réduit sensiblement l'efficacité de l'intersection,
- Les délais de communication ne sont pas acceptables puisque les véhicules tardent à obtenir une réservation, ceux-ci doivent alors s'arrêter avant de traverser et tout le trafic est ralenti.

Dans [108], les auteurs ont également mentionné d'autres problèmes majeurs :

- Un véhicule qui doit respecter sa réservation n'est pas en mesure d'éviter un véhicule qui peut se trouver à l'arrêt en sortie de l'intersection,
- Dans le cas où les volumes de trafic sont importants, tous les véhicules proposent en même temps des réservations, ce qui surcharge le serveur jusqu'à ce qu'un très faible pourcentage de réservations soit accepté. Il en résulte un arrêt obligatoire de tous les véhicules d'une part, et la saturation de la bande passante par les messages d'autre part.

Pour répondre à ces limites, les auteurs ont proposés des améliorations [108]. Contrairement au protocole de réservation initial, c'est le serveur qui propose les réservations aux véhicules, de manière à alléger notablement la charge de la bande passante en cas de congestion. De plus une réservation ne peut être accordée qu'au premier véhicule d'une file et les autres véhicules utilisent un ACC pour éviter la collision frontale. Ainsi, il est possible d'éviter les collisions au niveau des sorties de l'intersection.

Protocole du régulateur coopératif de vitesse pour les intersections (CACCi)

Le protocole de type CACCi (CACC for Intersections) est très proche du protocole de réservation. En effet il est également basé sur la capacité d'un véhicule contrôlé à effectuer des variations de vitesses de manière à traverser le plus vite possible l'intersection, c'est-à-

dire grâce à un système de type CACCi (voir 1.3.1.3). Cependant, contrairement à la réservation, un véhicule n'a pas d'objectif espace / temps à respecter. Dans [88,89,109,110,111] les auteurs définissent un contrôleur d'intersection qui cherche les conflits possibles de manière à éviter les collisions, à travers l'envoi aux véhicules d'indications d'adaptation de la vitesse. Cette indication peut être soit, "accélérer", soit "maintenir la vitesse", soit "décélérer". De plus, pour une question d'efficacité, il est nécessaire de définir une zone en amont de l'intersection pour permettre aux véhicules d'atteindre leur vitesse maximale avant d'atteindre la zone de conflit.

Cette approche présente l'avantage de considérer le problème de manière globale et d'être plus flexible que le système de réservation. En effet, une réservation doit être respectée ou annulée, tandis que dans le protocole CACCi il est possible d'adapter la vitesse des véhicules au fur et à mesure en fonction des dangers.

Malheureusement, le protocole CACCi repose toujours sur le principe qu'un véhicule va traverser à une vitesse maximale. Or dans les faits, les limites du contrôle des véhicules ainsi que les problèmes liés à la communication et au positionnement peuvent largement dégrader les performances attendues, en particulier en cas de débits importants du trafic.

Protocole de séquence

Plusieurs travaux s'intéressent aux protocoles de séquence [112,104,113,110,111]. Le protocole de séquence est simple et permet, contrairement aux autres protocoles, d'accepter des conducteurs humains. Chaque véhicule doit être équipé au moins d'un système de communication, d'un système de positionnement et d'un affichage à bord pour donner des indications au conducteur. Ce protocole est extensible aux véhicules semi-contrôlés et entièrement contrôlés. Le principe réside dans la détermination d'un ordre exact de passage des véhicules. L'ordre de passage peut ensuite être respecté de différentes manières. Dans l'exemple (voir Figure 1.14), le contrôleur d'intersection peut composer trois séquences possibles :

- Véhicule 1, puis véhicule 3, puis véhicule 2,
- Véhicules 1 et 2 ensembles, puis véhicule 3,
- Véhicule 3, puis véhicules 1 et 2 ensembles.

Une fois définie, la séquence est appliquée strictement par envoi successif des droits de passage aux véhicules concernés en respectant les conflits entre les mouvements, de manière à éviter les collisions.

Les tests réalisés avec des mini-robots décrits dans [104] ont montré la sécurité de l'intersection, même à travers une communication non fiable et lente (Bluetooth). Cependant, les tests ont révélés que des erreurs de positionnement peuvent amener à des collisions, mais également à des interblocages.

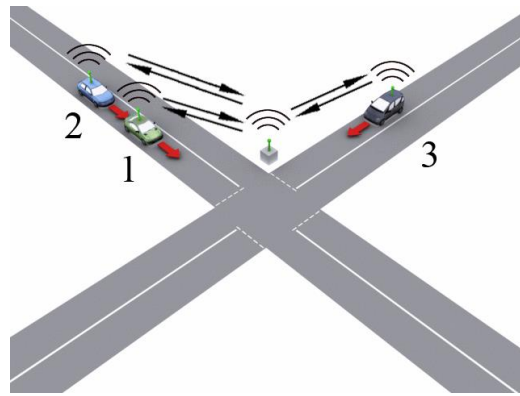


Figure 1.14 - Protocole de séquence

Dans ce mémoire, pour les raisons évoquées précédemment, nous choisissons le protocole de séquence. En effet, c'est celui qui nous semble le plus adapté pour la sécurité, l'efficacité, mais également la flexibilité.

1.3.2.4 Politique de régulation

La politique de régulation tire avantage du protocole de régulation de manière à améliorer l'efficacité de l'intersection. Nous nous intéressons ici à deux types de politique que nous appelons **PAPS (Premier Arrivé, Premier Servi)** et **AS (Algorithme de Séquence)**.

PAPS (Premier Arrivé, Premier Servi)

Cette politique est principalement appliquée dans les travaux utilisant le protocole de réservation [96,97,98,99,100,101,108,102,103,105]. Les véhicules obtiennent le droit de passage dans l'ordre dans lequel ils contactent le serveur d'intersection, quels que soient les conflits entre les mouvements souhaités. L'efficacité de cette politique repose donc entièrement sur la capacité des véhicules à effectuer les croisements très rapidement en passant un temps très faible dans la zone de conflit.

AOS (Algorithme d'Optimisation de la Séquence)

Particulièrement intéressante pour un protocole de séquence, cette politique de régulation a pour but de rechercher un ordre de passage des véhicules qui minimise un critère (temps d'évacuation total, temps de trajet moyen, temps de stop moyen etc.). Il s'agit d'un problème combinatoire de complexité NP-Difficile par rapport au nombre de véhicules et au nombre de voies. Le problème peut donc être résolu par des méthodes exactes telles que la programmation dynamique [114], ou des méthodes approchées telles que les algorithmes de colonies de fourmis [113], les algorithmes génétiques ou encore les algorithmes de recherche tabou. Ces méthodes sont souvent trop coûteuses en termes de temps de calcul pour une régulation en temps-réel. De plus la validité de la solution est très dépendante de la modélisation du problème. Le défi consiste donc à développer une heuristique capable de fournir une solution proche de l'optimal en temps-réel.

1.3.3 Discussion

Dans [80], les auteurs annoncent une progression rapide de la pénétration du marché par les véhicules ayant des capacités de communication et des capacités de contrôle limitées telles

que les systèmes ACC. Ainsi, d'ici 2020, la majorité des véhicules devraient être capables de communiquer entre eux et avec des infrastructures. Cependant, les auteurs prévoient une pénétration par les véhicules entièrement contrôlés plus tardive qui pourrait atteindre environ 50% vers l'année 2030. Il faut donc penser le problème de la régulation coopérative des intersections par rapport à ces estimations, et tenir compte des possibilités offertes dans les prochaines années, ainsi que des limites.

Plusieurs travaux notables ont fait avancer de manière significative l'idée de la régulation coopérative d'une intersection, en proposant plusieurs grands principes, concernant l'infrastructure mais également les méthodes de négociation et de distribution des droits de passage. Pour le choix de l'infrastructure, l'utilisation d'un serveur d'intersection semble maintenant se présenter comme une règle évidente pour garantir la sécurité, pour ne pas avoir recours à l'ajout de nombreux capteurs. Les protocoles de réservation et les protocoles basés sur les CACCi présentent des résultats très prometteurs, cependant ils ne sont pour l'instant pas applicables, principalement à cause de la dépendance d'un véhicule capable d'être ponctuel. Plusieurs travaux s'intéressent justement à améliorer le contrôle d'un véhicule de manière à ce qu'il puisse suivre précisément une trajectoire et respecter une vitesse [102,94,111].

Les protocoles basés sur la séquence semblent donc pour l'instant les plus appropriés pour les années à venir puisqu'ils utilisent au minimum les capacités de positionnement et de communication des véhicules, qui peuvent donc être entièrement contrôlés par des conducteurs humains. Ces protocoles peuvent ensuite graduellement accepter un contrôle partiel des véhicules. De plus, grâce au protocole de séquence, il est possible de créer des algorithmes temps-réel permettant de composer un ordre de passage optimisé par rapport aux contraintes matérielles et physiques tels que les délais de communication.

Quel que soit le protocole choisi, l'application dans les années à venir dans la réalité nécessite la prise en compte des véhicules n'ayant pas la capacité de communication. Pour répondre à cette question, plusieurs travaux proposent un système transitionnel à base de feux tricolores [99,115,111]. Ces études ont montré, d'une part que l'intégration de véhicules entièrement contrôlés au milieu d'une intersection classique présente des risques élevés, puisqu'il faut tenir compte des réactions des conducteurs humains. D'autre part que les protocoles initialement prévus pour tirer avantage des capacités des véhicules contrôlés présentent des performances très réduites dès qu'un faible pourcentage de conducteurs humains est admis.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé les différentes approches éprouvées de régulation des intersections à feux tricolores. Nous constatons que les feux tricolores ne permettent pas de réguler le trafic en prenant en considération chaque véhicule d'une manière individuelle. Or, dans un avenir proche, les véhicules pourront d'une part remonter l'information nécessaire au régulateur et d'autre part, suivre des consignes précises. Ceci a encouragé l'émergence de la thématique de la régulation coopérative qui a été présentée dans ce chapitre. Nous avons aussi proposé une classification des travaux réalisés autour de cette thématique en distinguant les protocoles de la politique de régulation.

Malgré le nombre de travaux, à notre connaissance très peu de tests réels ont été réalisés permettant de valider les protocoles proposés. En outre, les tests réalisés avec succès sont limités à l'intersection de deux véhicules, ce qui empêche d'aborder les problématiques de protocoles et de politiques de régulation. Notre travail consiste dans le chapitre suivant à proposer une approche de régulation en définissant les protocoles et les politiques de régulation.

CHAPITRE N°2. REGULATION DU TRAFIC AUX INTERSECTIONS

Introduction

La mise en place d'une régulation coopérative nécessite le développement d'un nouveau système de signalisation, qui prend en considération chaque véhicule de manière individuelle (voir Figure 2.1). De plus l'utilisation de cette signalisation passe par la présentation d'une formulation mathématique adaptée. Il est donc important pour commencer de décrire le problème.

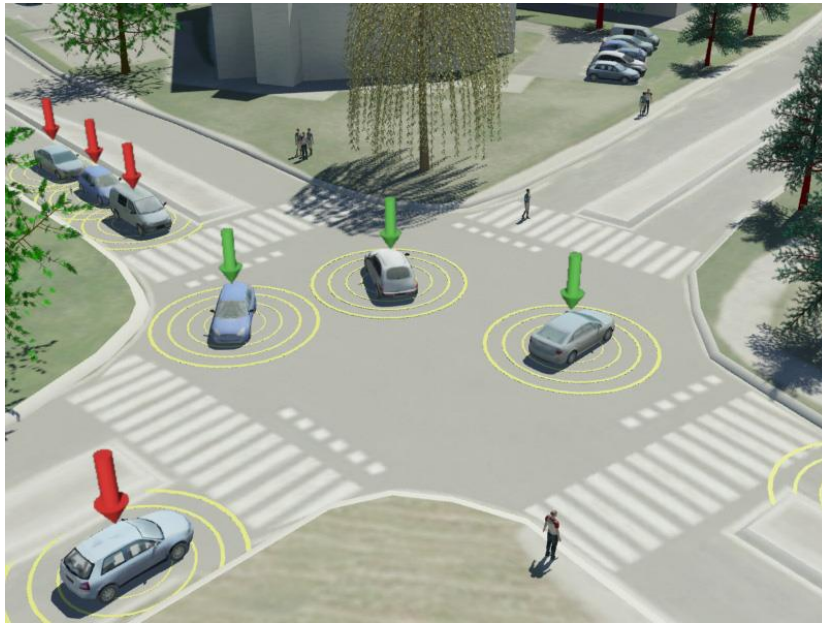


Figure 2.1 - Nouveau système de signalisation individuelle

Nous rappelons que chaque véhicule est équipé au minimum d'un système de communication sans-fil pour négocier le droit de passage, d'un système de positionnement et d'un radar frontal. Quand un véhicule arrive dans une intersection, il envoie une requête jusqu'à obtenir un droit de passage. L'envoi par les véhicules de leur position ou de leur vitesse peut également contribuer à la négociation. Nous considérons que chaque véhicule possède également un système de signalisation interne permettant d'afficher l'état du droit de passage. Par exemple, le conducteur peut lire un symbole de couleur rouge ou de couleur verte pour désigner respectivement l'interdiction de passer et le droit de passage. La couleur orange peut exister pour indiquer des cas de défaillance d'un système ou dans les cas dangereux tels que l'arrêt d'un véhicule à la sortie de l'intersection. Cependant ces cas ne sont pas traités dans cette thèse.

Quelle que soit l'intersection considérée, nous posons les hypothèses suivantes :

1. Chaque véhicule est équipé d'un système de communication sans-fil qui permet d'échanger des messages avec les autres véhicules (V2V) et l'intersection (V2I). En particulier la communication avec un serveur d'intersection permet d'engager la négociation du droit de passage,

2. Chaque véhicule est équipé d'un système de positionnement d'une précision suffisante pour distinguer les voies de circulation, capable de fournir une position relative à l'intersection, en particulier par rapport aux voies et à la zone de partage des différents mouvements possibles. De plus, chaque véhicule possède un radar frontal qui lui permet de mesurer la distance qui le sépare du véhicule qui le précède, ou éventuellement de tout autre obstacle tel qu'un piéton,
3. Chaque véhicule est équipé d'un système de signalisation interne qui affiche au minimum un symbole de couleur verte ou de couleur rouge, en fonction de l'état du droit de passage,
4. Les véhicules d'une même voie traversent l'intersection dans le même ordre que leur ordre d'occupation dans la voie,
5. Il existe un temps minimum s entre le passage de deux véhicules successifs provenant de mouvements conflictuels. Ce temps est composé du temps nécessaire pour traverser l'intersection, du temps d'accélération plus un temps de sécurité. En pratique, l'estimation de ce temps repose sur des statistiques sur les véhicules et l'architecture de l'intersection,
6. Deux véhicules successifs d'une même voie sont séparés par un temps minimum d quand ils traversent la zone de conflit. Cette mesure est appelée temps inter-véhiculaire. Cette distance temporelle de sécurité est déterminée par le temps de réaction minimum du conducteur plus le temps de réponse des systèmes mécaniques et hydrauliques. De plus on émet l'hypothèse $d < s$. En effet de nombreuses recherches ont confirmé celle-ci,
7. Un véhicule ayant un temps inter-véhiculaire inférieur ou égal à d constitue un convoi avec son prédécesseur (voir Figure 2.2). Avec $d > 1/Q$ où Q est la capacité de la voie.
8. Le droit de passage est reçu grâce à la communication sans-fil. Deux véhicules qui effectuent des mouvements conflictuels ne peuvent pas obtenir le droit de passage en même temps,
9. La couleur affichée par défaut sur le système de signalisation interne est le rouge (Refus par défaut),
10. Si le véhicule a obtenu le droit de passage, il le garde jusqu'à ce qu'il quitte l'intersection.

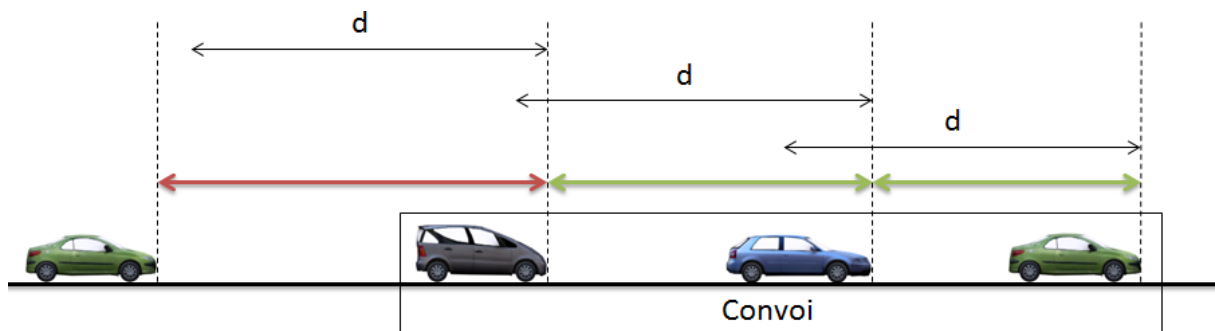


Figure 2.2 - Formation d'un convoi de véhicules

Pour gérer la position d'un véhicule dans l'intersection, on ajoute la notion de marqueurs de position (voir Figure 2.3). Ces marqueurs notés 1, 2 et 3 sur la figure, permettent de délimiter respectivement les trois zones : zone de stockage, zone de conflit et zone de sortie.

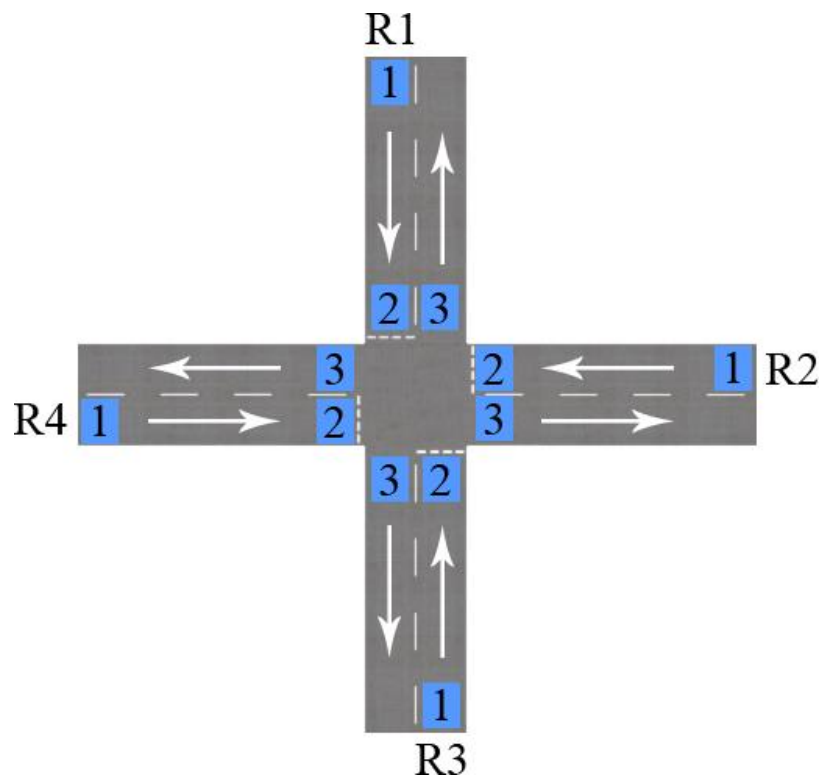


Figure 2.3 - Marqueurs de position

Dans la première partie nous proposons un protocole capable de répondre aux hypothèses posées. Ce protocole doit servir de base de travail, il doit donc permettre de réguler aussi bien une intersection de mini robots qu'une intersection de véhicules à échelle réelle, ou encore des véhicules virtuels en simulation. Le protocole doit répondre en priorité à des questions de sécurité qui seront soumises à des tests réels dans la deuxième partie. Une fois que la faisabilité est assurée le protocole doit permettre de s'intéresser exclusivement à la séquence de passage des véhicules, c'est-à-dire du point de vue de l'optimisation (réduction de la congestion ou réduction des temps d'attente). Ainsi la troisième partie propose un algorithme de calcul de la séquence optimale de passage servant d'outil de comparaison. Dans la partie suivante nous proposons un modèle réseau de Petri permettant la mise en place du protocole dans le cadre d'une utilisation temps-réel. Une stratégie de régulation est également proposée. Finalement des simulations vont permettre de montrer l'avantage de la stratégie proposée, notamment par rapport à la solution exacte.

2.1 Implémentation (Système du Véhicule Actionneur Coopératif)

L'implémentation du protocole SVAC (Système du Véhicule Actionneur Coopératif) repose principalement sur trois questions qui sont développées dans [116]. La première concerne le zonage qui doit permettre aux véhicules de se positionner dans l'intersection à partir du découpage défini précédemment. Les règles d'implémentation logicielle sont ensuite étudiées,

pour permettre le développement de la solution sur n'importe quel système. Finalement il est primordial de définir une architecture de communication fiable, décrivant les échanges de messages entre les véhicules et le serveur d'intersection lors du processus de négociation.

2.1.1 Zonage

Les erreurs de positionnement représentent une cause majeure de collision. En effet, la précision, la disponibilité, la fiabilité, ainsi que les latences du système de positionnement de chaque véhicule, constituent l'intégrité de base du MCI. Cependant, le niveau de qualité requis dépend du protocole. SVAC divise l'espace d'une simple intersection en trois zones : zone de stockage, zone de conflit et zone de sortie (voir Figure 2.4). Nous ajoutons également une zone d'entrée en amont de l'intersection. Cette simple division de l'espace de l'intersection permet de limiter certaines causes de collision et d'interblocage. En effet, la zone d'entrée n'est pas une zone de négociation contrairement à la zone de stockage, c'est-à-dire qu'aucun véhicule ne peut obtenir le droit de passage dans cette zone. Ainsi elle permet de laisser du temps au véhicule pour prendre connaissance de la situation en approche tout en s'identifiant auprès du serveur, notamment pour une question de respect d'une vitesse sécurisée.

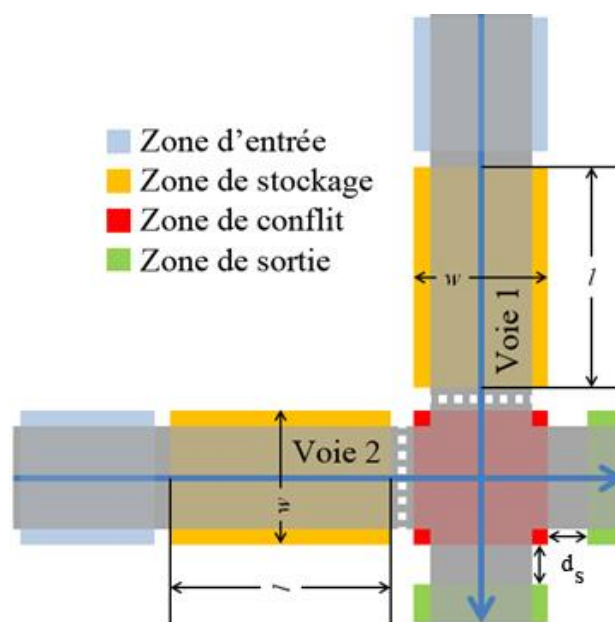


Figure 2.4 - Découpage en zones du protocole SVAC

Nous rappelons que ces deux problèmes sont communs à tous les protocoles de MCI. Il y a plusieurs solutions pour éviter qu'ils se produisent, ou au moins pour réduire leur occurrence. Pour les véhicules équipés d'un système DGPS/EGNOS, la longueur l de la zone de stockage et la distance entre la zone de sortie et la zone de conflit d_s doivent correspondre à la précision et aux délais du système de positionnement ainsi qu'à la vitesse du véhicule. Nous définissons donc initialement une vitesse limite. Ainsi, tant que le conducteur ne respecte pas cette vitesse limite, le serveur refuse de donner le droit-de-passage. Cette règle doit être appliquée avant l'accès à la zone de stockage. Elle permet notamment d'augmenter le nombre de positions enregistrées sur une même distance, ce qui permet d'augmenter la précision. Pour cette raison, nous avons introduit une zone d'entrée (voir Figure 2.4). La largeur w désigne la

distance qui sépare les deux extrémités de la voie, cette mesure est particulièrement utile dans le cas où plusieurs voies sont parallèles (appartenance à une même route). En effet, la largeur de chaque voie doit être suffisante pour que le système de positionnement soit capable de déterminer dans quelle voie le véhicule se trouve.

2.1.2 Implémentation logicielle

L'implémentation du protocole SVAC est pensée comme une application qui partitionne la charge du contrôleur d'intersection entre l'intersection et les véhicules, en utilisant un modèle **client-serveur**. La partie **client** représente chaque véhicule, tandis que la partie **serveur** se réfère au contrôleur d'intersection. Un système de communication externe est utilisé entre chaque client et le serveur. De plus, l'implémentation du protocole SVAC est basée sur une architecture de type MVC (Modèle Vue Contrôleur).

Ainsi chaque partie de l'application (client ou serveur) comporte (voir Figure 2.5) :

- une classe de **données** (*Data*) qui représente le modèle,
- une classe **observateur d'événements** (*EventsObserver*) qui correspond au contrôleur,
- une classe d'**affichage** (*View*) qui représente la partie vue.

L'**ordonnanceur d'intersection** (*IntersectionScheduler*) contient l'algorithme qui a pour rôle d'optimiser la séquence de passage des véhicules. Il est séparé de l'observateur d'événements puisque nous considérons qu'il existe un comportement basique du serveur quel que soit le processus d'optimisation. Ce comportement basique doit notamment permettre d'éviter les collisions en traitant les entrées et les sorties des véhicules. L'observateur d'événements se trouve donc au cœur du protocole SVAC.

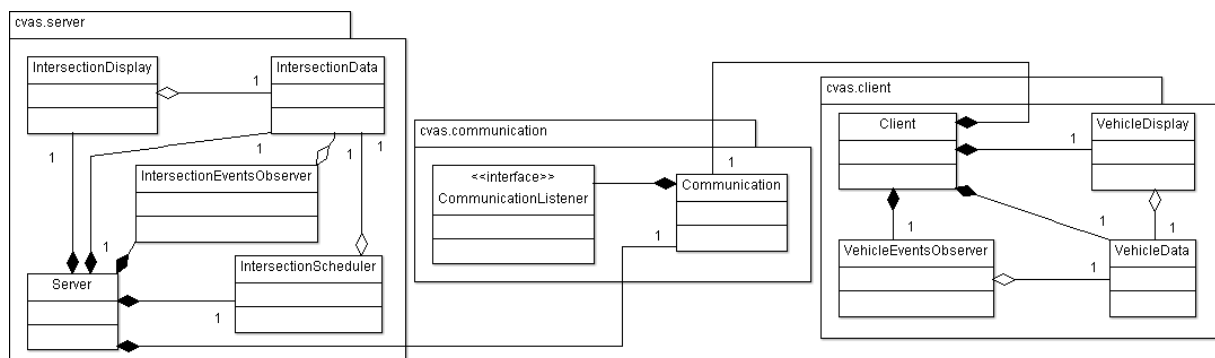


Figure 2.5 - Diagramme de classes du protocole SVAC

2.1.2.1 Classes des données

Il existe deux classes de données nommées *VehicleData* et *IntersectionData*. Les deux possèdent une carte commune de l'intersection et des zones. La classe *VehicleData* permet de stocker les informations d'un véhicule, c'est-à-dire sa position, sa vitesse, l'état de son droit-de-passage, la voie occupée, ou encore la distance du véhicule qui précède. La classe *IntersectionData* regroupe les informations de tous les véhicules présents dans l'intersection, comme la distance qui les sépare de la zone de sortie.

2.1.2.2 Affichage

Du côté du véhicule, la classe *VehicleDisplay* a une tâche très simple, elle se contente d'afficher la couleur du droit-de-passage, c'est-à-dire rouge, vert ou éventuellement orange. Nous avons étendu la classe pour permettre l'affichage de la position du véhicule par rapport aux zones de l'intersection, de manière à rassurer le conducteur sur le bon fonctionnement du système (voir partie gauche de la Figure 2.6). La classe *IntersectionDisplay* permet de suivre le fonctionnement du protocole en affichant la position de tous les véhicules par rapport à l'intersection, ainsi que l'état des droits-de-passage.

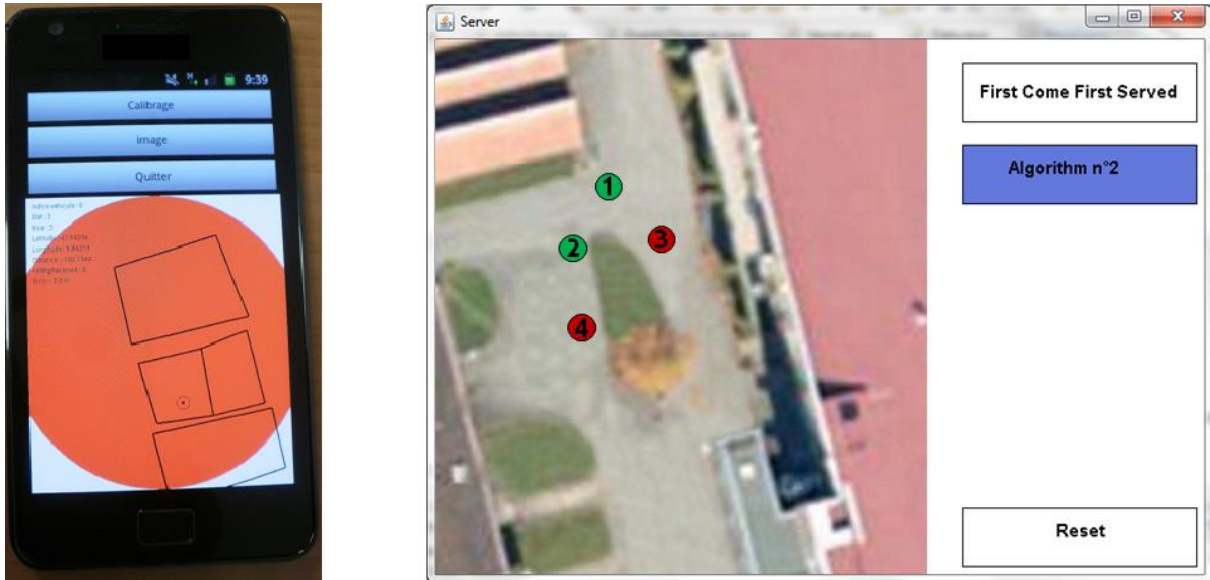


Figure 2.6 - Implémentation du protocole SVAC

2.1.2.3 Observateur d'événements

L'observateur d'événements a pour rôle d'analyser chaque événement à travers les messages reçus et les données disponibles, de manière à prendre une décision en conséquence. Plus précisément, la classe *VehicleEventsObserver* détermine les requêtes qui vont être envoyées au serveur et la signalisation à afficher au conducteur. Il contrôle la signalisation de la manière suivante :

- Le véhicule a le vert seulement s'il a reçu le droit-de-passage du serveur,
- Le vert est enlevé uniquement si le véhicule a quitté l'intersection, c'est-à-dire la zone de conflit,
- Le véhicule a le rouge s'il n'a pas reçu le droit-de-passage. En particulier le rouge est affiché dans le cas où le véhicule ne respecte pas la limitation de vitesse tout en se trouvant dans la zone de stockage.

Si le véhicule a reçu le droit-de-passage, la classe *VehicleEventsObserver* doit suivre le comportement du véhicule de manière à détecter un danger potentiel ou un interblocage (véhicule ayant un droit-de-passage mais se trouvant derrière un véhicule n'ayant pas le droit de traverser).

La classe *IntersectionEventsObserver* crée et gère la liste de présence des véhicules dans l'intersection. Elle ajoute et détruit les véhicules en fonction de leur position. Elle observe également les interblocages de manière à résoudre le problème. En effet, un interblocage se produit si l'ordre des véhicules dans la liste de présence est différent de l'ordre réel (voir Figure 2.7). Cette situation peut être due à :

- L'ordre des messages reçus par le serveur s'il est différent de l'ordre réel,
- Une erreur de positionnement qui a provoqué une erreur dans l'ordre des véhicules.

La situation d'interblocage peut être détectée si tous les véhicules ayant reçu le vert sont arrêtés définitivement. La solution consiste à distribuer des droits-de-passage à tous les véhicules à proximité du ou des véhicules bloqués dans la même voie. La distance est déterminée par rapport à la précision du système de positionnement.

La classe *IntersectionEventsObserver* détermine également quels véhicules doivent être considérés dans la classe *IntersectionScheduler*. En effet, l'observateur d'événements du serveur est capable de distribuer le droit-de-passage sans faire appel à l'ordonnanceur pour certaines situations triviales comme le cas d'un véhicule qui n'est en conflit avec aucun autre. De plus, les véhicules qui ont déjà obtenu le vert ne nécessitent plus d'être considérés par l'ordonnanceur.

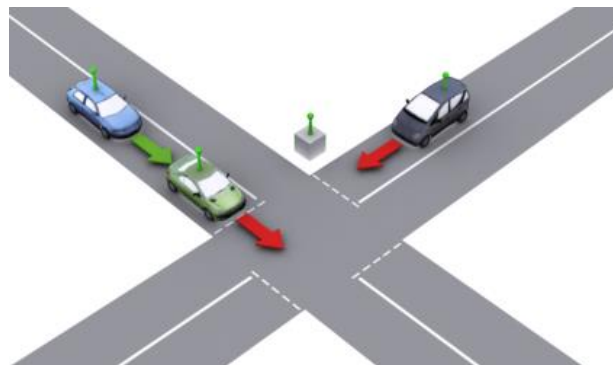


Figure 2.7 – Exemple de situation d'interblocage

2.1.3 Architecture de communication

L'architecture de communication est basée sur l'utilisation d'un serveur d'intersection. La négociation du droit-de-passage est entièrement basée sur le mode de communication V2I. Ainsi chaque véhicule possède son propre système de communication et est capable de communiquer avec le serveur de manière à négocier (voir Figure 2.8). Dans la description des échanges de messages, nous choisissons de ne pas considérer la zone d'entrée qui ne fait pas partie du processus de négociation. Nous considérons que cette zone est une sécurité supplémentaire pour permettre au véhicule de ralentir et de s'enregistrer auprès du serveur, avant le début réel de la négociation dans la zone de stockage.

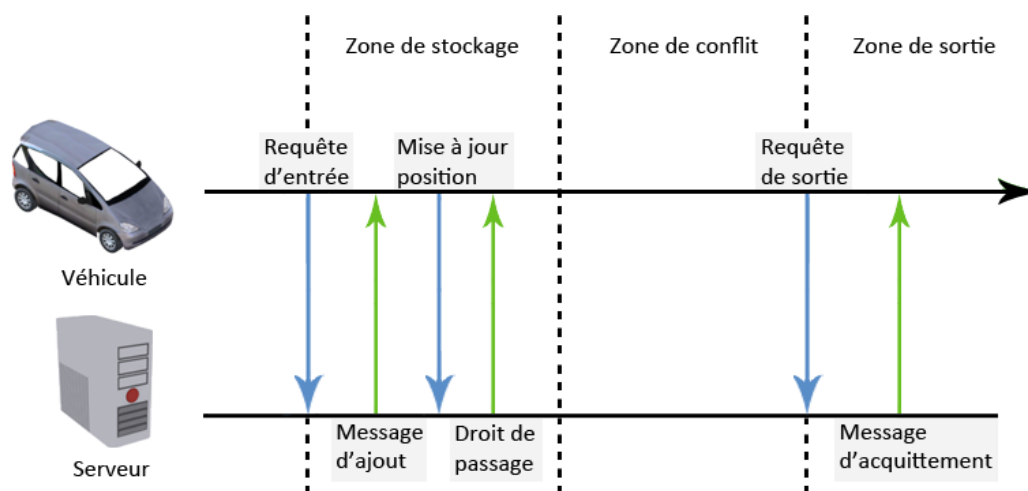


Figure 2.8 - Architecture de communication du protocole SVAC

2.1.3.1 Rôle du serveur

Le serveur d'intersection a pour rôle d'assurer la sécurité des véhicules ainsi que la distribution des droits-de-passage. Il récolte les informations des véhicules de manière à déterminer une séquence de passage. Grâce à cette séquence et l'observation des conflits entre les différents mouvements, le contrôleur d'intersection envoie les droits-de-passage aux véhicules.

2.1.3.2 Rôle du véhicule

Dès qu'un véhicule atteint une zone de stockage il envoie des **requêtes d'entrée** au serveur de l'intersection correspondante jusqu'à ce qu'il soit enregistré dans la liste de présence. Le véhicule envoie alors des **messages de mise à jour** pour informer le serveur d'intersection de sa position par rapport à la zone de conflit et par rapport à la zone de sortie. Une fois le droit-de-passage obtenu, le véhicule traverse la zone de conflit pour rejoindre une sortie de l'intersection. Quand la zone de sortie est atteinte, le véhicule envoie des **requêtes de sortie** tant qu'il ne disparaît pas de la liste de présence des véhicules.

2.1.3.3 Priorités des messages

La sécurité est principalement assurée par l'architecture de communication et les règles qui définissent le protocole. En effet, les délais de communication réduisent simplement l'efficacité de l'intersection, mais n'augmentent pas directement le risque de collision. Cependant, d'autres problèmes peuvent apparaître dans le cas où un conducteur a un comportement dangereux. Même si un tel comportement est limité par le simple fait qu'afficher le rouge à l'intérieur de l'habitacle est plus dissuasif que les feux tricolores. En effet, un conducteur ayant le rouge est sûr qu'un autre véhicule en conflit est en train de traverser. Il est intéressant d'utiliser les données disponibles pour informer les autres véhicules qu'un conducteur est dangereux. Ainsi, chaque contrôleur de véhicule ne considère que les derniers messages provenant du serveur d'intersection, de manière à détecter rapidement les messages de danger. Grâce à l'observation de la trajectoire et de la vitesse d'un véhicule, le contrôleur peut donc à tout moment alerter le serveur d'intersection en cas de danger.

Une perte de messages peut également engendrer un blocage, dans le cas où un véhicule qui est sorti de l'intersection n'arrive pas à communiquer l'information au serveur d'intersection. En effet, dans ce cas le véhicule est toujours considéré comme un obstacle dans la zone de conflit.

Pour les raisons évoqués ici, on définit un niveau de priorité pour les messages. Ainsi les systèmes de communication respectent quatre niveaux :

- Niveau 3 : véhicule ayant un comportement dangereux,
- Niveau 2 : véhicule qui sort de l'intersection,
- Niveau 1 : délai de communication détecté,
- Niveau 0 : autres messages.

2.1.4 Discussion

Dans cette partie, nous avons présenté les choix d'implémentation qui doivent permettre la mise en place du protocole SVAC. Il est nécessaire d'effectuer des tests réels pour prouver la faisabilité du protocole, mais également pour évaluer la capacité de la stratégie de contrôle à améliorer l'efficacité de l'intersection.

2.2 Tests réels

La réalisation des tests réels a plusieurs objectifs principaux. On note cependant que tous ces objectifs doivent tenir compte des différents problèmes liés aux systèmes utilisés, c'est-à-dire les délais de communication, la disponibilité des mesures, ou encore la précision de ces dernières. Ainsi on s'intéresse en particulier aux objectifs suivants :

- Confirmer la faisabilité du protocole SVAC en conditions réelles, en particulier pour les questions de sécurité,
- Traiter le problème d'interblocage qui peut survenir en cas de position erronée,
- Les observations doivent conduire à la confirmation de l'hypothèse de départ $d < s$ qui nous dit qu'il est plus avantageux de faire passer des véhicules qui se suivent dans une voie sous forme de convois (en fonction de d),
- Observer le comportement des utilisateurs d'un tel système, en particulier par rapport au principe de signalisation individuelle se trouvant dans l'habitacle de chaque véhicule.

Des tests de faisabilité du protocole SVAC ont été présentés initialement dans [104]. Ces derniers étaient basés sur une intersection de mini-robots (Lego Mindstorms NXT) utilisant un système de communication Bluetooth ainsi que des capteurs couleurs pour la détection des zones. Nous soulignons le fait que la communication Bluetooth en mode "point d'accès" s'est avérée très mauvaise avec d'importants délais de communication dépassants plusieurs secondes. Pourtant aucune collision ne s'est produite en conséquence. En revanche, les tests ont mis en évidence un risque de collision dans le cas d'une erreur de positionnement. En particulier ici il s'agissait d'un problème de détection des marqueurs de couleurs qui marquent les extrémités des zones, principalement en cas de faible éclairage.

Il a donc été décidé de réaliser des expérimentations à grande échelle avec des véhicules réels, équipés individuellement d'un smartphone et négociant avec un ordinateur portable faisant office de serveur d'intersection. Nous avons notamment voulu comparer les résultats de la régulation à travers une politique PAPS et à travers une politique qui favorise le passage sous forme de convoi. Les tests décrits par la suite sont présentés dans [116].

2.2.1 Environnement de test

L'intersection est localisée dans une zone industrielle (voir Figure 2.9 et Figure 2.10) dans la ville de Belfort. La distance minimale entre la détection de la voie et la zone de conflit L est de 25 m. La largeur de chaque voie est d'environ 12 m. Les zones de stockage sont délimitées par un rectangle de 25 m de long sur 19 m de large. La largeur additionnelle est fournie par l'espace qui sépare les deux voies. Par rapport aux conditions de sécurité, on admet une erreur de 7 m même si les tests préliminaires n'ont pas montré de telles valeurs. A cause des dimensions réduites des zones la vitesse est limitée à 25 km/h. Cette limitation est transparente pour le conducteur puisque le véhicule affiche la couleur rouge pour obliger celui-ci à ralentir avant la zone de stockage. Le système de communication peut couvrir 500 m sans problèmes significatifs. La distance qui sépare les zones de sortie des zones de stockages est d'environ 11 m.

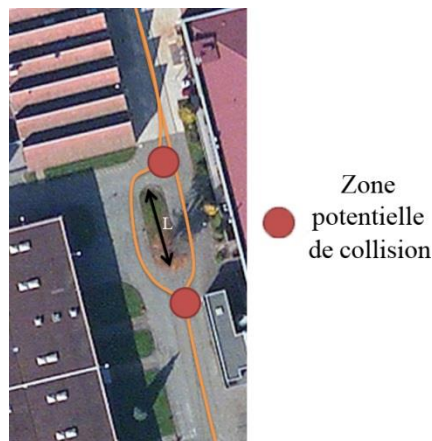


Figure 2.9 - Environnement des tests réels



Figure 2.10 - Délimitation des zones dans l'environnement des tests réels

2.2.2 Observation comportementale

A partir des tests effectués et de l'observation du comportement des utilisateurs, on peut faire plusieurs remarques :

Avant familiarisation avec le système :

- Deux utilisateurs se sont arrêtés dès l'affichage du rouge, parce qu'ils sont habitués à la présence du feu au niveau de la ligne d'arrêt dans le cas des feux tricolores,
- Les mêmes utilisateurs ont été perturbés par le refus par défaut. En effet, dans certains cas le vert est affiché tout de suite après l'affichage du rouge, ce qui donne un changement très rapide de couleur qui est interprété par les conducteurs comme une hésitation du système.

Après familiarisation avec le système :

- Les deux précédents problèmes n'ont plus été constatés. En effet, les conducteurs se sont habitués à la nouveauté. Ils savent maintenant qu'il n'est pas obligatoire de garder les yeux sur l'affichage, puisqu'ils doivent s'arrêter au niveau de la zone de conflit, sauf si le vert est affiché. De plus, le vert est définitif, il suffit donc d'un rapide regard vers le système pour connaître la décision à appliquer,
- Certains conducteurs vont plus vite car ils prennent confiance dans le système,
- Après l'expérience, un conducteur a jugé qu'il a été difficile de revenir à la signalisation habituelle (panneau stop, priorités, etc.) après avoir testé le système.

Ces remarques ont pu mettre en évidence la nécessité d'étudier l'ajout d'une signalisation supplémentaire (latérale ou horizontale) ainsi que l'amélioration de l'affichage interne. Elles mettent également en évidence le fait qu'afficher une indication de vitesse au cours du trajet est discutable, car il risque de prendre une importante part de l'attention du conducteur.

2.2.3 Cas critiques et priorité des messages

Le niveau de priorité maximal des messages a pour but de réduire les risques de collisions au maximum. Cependant, une telle politique pourrait encourager le non-respect du droit-de-passage en réduisant la nature dissuasive du protocole SVAC. Une solution à ce dilemme est d'implémenter le système dans des véhicules capables de s'arrêter automatiquement avant la ligne de stop dans le cas du signal rouge. Ce point particulier met en avant le fait que la généralisation du protocole SVAC nécessite la prise en compte des cas critiques, en ajoutant des équipements, des capteurs ainsi qu'un signal orange intermédiaire.

2.2.4 Question d'efficacité

La comparaison entre la politique PAPS et l'optimisation de l'algorithme montre que du temps peut être gagné, même pour quatre véhicules. En effet, le temps total d'évacuation qui résulte de l'algorithme représente seulement 70% du temps d'évacuation total qui résulte de la politique PAPS. Le temps perdu provient principalement de la distance entre la zone de stockage et la zone de sortie qui contient une marge de sécurité pour gérer les erreurs de positionnement.

2.2.5 Discussion

Les tests réels ont permis de prouver la faisabilité du protocole SVAC, et en particulier de confirmer les hypothèses de départ concernant la sécurité. On note principalement la robustesse du protocole face aux délais de communication quels qu'ils soient. En revanche le protocole nécessite obligatoirement un niveau de précision de la position suffisant, malgré la possibilité de fixer des marges de sécurité. Par exemple un véhicule ne doit pas se tromper dans la détection de la voie dans laquelle il se trouve.

Du point de vue de l'optimisation, les observations semblent confirmer l'hypothèse de départ $d < s$. En effet deux véhicules qui se suivent dans une même voie traversent clairement plus rapidement que deux véhicules se trouvant dans des voies conflictuelles. Nous expliquons ce phénomène de la manière suivante. Le temps d observé dépend uniquement de l'observation de la distance du véhicule qui précède et de sa vitesse. Ainsi deux véhicules qui se suivent peuvent traverser sans interruption la zone de conflit. Le temps d n'a donc aucune raison de varier pour un même conducteur et semble ne pas dépasser 2 secondes. Le temps s observé dépend en revanche de plusieurs paramètres. En effet le déroulement pour que le droit de passage change de voie est le suivant :

- Le premier véhicule traverse la zone de conflit,
- Une requête de sortie est transmise au serveur d'intersection,
- Le serveur d'intersection décide d'autoriser le deuxième véhicule,
- Un droit de passage est transmis au deuxième véhicule,
- Le deuxième véhicule accélère pour traverser la zone de conflit ou garde sa vitesse s'il est déjà à la vitesse maximale autorisée.

Grâce au premier et au dernier point du déroulement on peut valider que $d < s$. En effet le deuxième véhicule vise un arrêt avant la zone de conflit tant que le premier véhicule n'est pas sorti. Il doit donc considérer la zone de conflit comme un obstacle ayant une vitesse nulle. Ainsi quelles que soient la position et la vitesse du véhicule il s'écoulera au minimum le temps d de sécurité avant qu'il ne puisse entrer dans la zone de conflit, et à fortiori pour en sortir. De plus on remarque que le premier point du déroulement dépend d'une question de positionnement, tandis que les deuxième et quatrième points sont dépendants du système de communication. Le troisième point est lui relatif au temps de calcul de la séquence de passage. Ainsi toute imprécision du système de positionnement, tout délai de communication ou toute méthode de calcul de la séquence gourmande en temps de calcul, ne peut qu'augmenter la valeur moyenne du temps s .

Grâce au protocole SVAC et à la confirmation de l'hypothèse de départ $d < s$ on peut s'intéresser pour la suite exclusivement à la méthode de composition de la séquence de passage. En effet il semble intéressant d'exploiter l'idée de convois de véhicules pour optimiser l'évacuation d'une intersection. Il est possible de minimiser le temps d'évacuation total, ou bien de minimiser le temps d'attente total. Nous choisissons de nous intéresser au temps d'évacuation. Nous proposons dans un premier temps une méthode de résolution exacte basée sur l'utilisation des temps s et d avec pour objectif de minimiser le temps total

d'évacuation. Cette méthode servira d'outil de comparaison pour des tests avec un plus grand nombre de véhicules et pour n'importe quelle architecture d'intersection.

2.3 Calcul de la solution optimale par la programmation dynamique

La création de la séquence optimale de passage des véhicules est un problème combinatoire. En effet, on rappelle que l'objectif est de réduire le temps total d'évacuation. Ainsi, il est nécessaire de parcourir l'ensemble des solutions, c'est-à-dire des séquences de passage. Il est donc possible d'appliquer une méthode de résolution exacte telle que la programmation dynamique.

La formulation du problème que nous proposons est une généralisation de celle présentée dans [117]. En effet, la méthode de résolution admet initialement un simple croisement de deux mouvements tout-droit. L'objectif de cette partie est donc de généraliser la formulation du problème à la prise en compte de n'importe quelle architecture d'intersection. Cette nouvelle formulation ainsi que les tests réalisés ont été présentés dans [118,119,120].

Le problème repose sur l'utilisation des temps moyens d et s . Nous soulignons le fait que l'évaluation de ces paramètres est une estimation qui dépend d'une mesure statistique sur l'intersection étudiée. Ainsi le résultat obtenu peut varier en fonction de la validité de ces estimations. Nous décidons d'appeler la méthode Solution Globale (SG) en référence à la connaissance des dates d'arrivée de tous les véhicules.

2.3.1 Formulation du problème

Pour formuler le problème de la solution globale, on se réfère à un ensemble de notations (voir Tableau 2.1). Nous considérons une succession de N véhicules qui arrivent sur L voies d'une même intersection. En associant pour chaque voie, une ou plusieurs sorties, on obtient un ensemble de R mouvements possibles. Initialement un nombre N_i de véhicules doivent arriver dans la voie i .

Chaque véhicule k arrive sur la voie l_k pour effectuer un mouvement r_k . Nous connaissons également a_k et e_k , respectivement l'estimation du moment auquel ce véhicule doit arriver au niveau de la zone de conflit, et l'estimation du moment auquel le véhicule aura quitté l'intersection.

De plus la fonction $c_{(x,y)}$ nous permet de construire la matrice des conflits entre tous les groupes de mouvements (x, y) .

N	Nombre de véhicules qui doivent traverser l'intersection
L	Nombre de voies de l'intersection (zones de stockage)
R	Nombre de mouvements possibles
N_i	Nombre de véhicules qui doivent traverser l'intersection depuis la voie i
n_i	Nombre actuel de véhicules de la voie i étant sortis de l'intersection
$k_{(i,n)}$	$n^{ième}$ véhicule se trouvant dans la voie i avec $n \in [1, N_i]$
d	Temps inter-véhiculaire minimum entre deux véhicules de la même voie
s	Temps minimum entre deux véhicules de mouvements conflictuels
l_k	Numéro de voie occupé par le véhicule k
r_k	Numéro de mouvement effectué par le véhicule k

a_k	Temps estimé auquel le véhicule k doit atteindre l'entrée de la zone de conflit
e_k	Temps estimé auquel le véhicule k doit atteindre la zone de sortie
$c_{(x,y)}$	= 1 s'il existe un conflit entre les mouvements x et y , sinon 0

Tableau 2.1 – Notations pour le problème de la Solution Globale (SG)

Nous rappelons que la fonction-objectif du problème consiste à minimiser le temps total d'évacuation de l'intersection. Il s'agit donc de minimiser le maximum des temps de sortie de tous les véhicules :

$$\min(\max(e_1, \dots, e_N)) \quad (2.1)$$

Sous les contraintes :

$$a_k < a_{k+1}, k \in [1, N - 1] \quad (2.2)$$

$$a_k < e_k \quad (2.3)$$

$$e_k - e_m \geq d, l_k = l_m, k > m \quad (2.4)$$

$$e_k - e_m \geq s, c_{(r_k, r_m)} = 1, k > m \quad (2.5)$$

A partir de la formulation du problème, nous avons choisi d'utiliser un algorithme basé sur la programmation dynamique faisant partie des méthodes de résolution qui fournissent une solution optimale. Le principe général de cette méthode repose sur le découpage du problème principal en plusieurs sous-problèmes, qui eux même sont découpés en plusieurs sous-problèmes et ainsi de suite.

Pour représenter le problème, nous utilisons un graphe orienté $G = (V, A)$ avec la définition d'un nœud $[n_1, \dots, n_L, k] \in V$. Un nœud contient le nombre actuel de véhicules n_i qui a déjà quitté chaque voie i , ainsi que l'indice k du dernier véhicule ayant été ajouté à la séquence. En utilisant l'indice k on obtient la voie l_k ainsi que le mouvement r_k du véhicule.

La méthode consiste à trouver le meilleur chemin p depuis le nœud $[0, \dots, 0]$ jusqu'au nœud $[N_1, \dots, N_L]$, c'est-à-dire déterminer chaque séquence de passage qui permet d'atteindre un état dans lequel tous les véhicules ont traversé l'intersection. Pour chaque nœud $[n_1, \dots, n_L, k]$ on décompose le problème en un maximum de L nouveaux nœuds. En effet en partant de la dernière action réalisée, il est nécessaire de choisir la prochaine voie qui sera autorisée, en fonction des véhicules restants. Par exemple, pour une intersection classique à quatre branches ($L = 4$), le nœud $[n_1, n_2, n_3, n_4, k]$ donne au maximum les quatre enfants suivants :

$$[n_1 + 1, n_2, n_3, n_4, k_{(1, n_1 + 1)}], n_1 + 1 \leq N_1,$$

$$[n_1, n_2 + 1, n_3, n_4, k_{(2, n_2 + 1)}], n_1 + 1 \leq N_2,$$

$$[n_1, n_2, n_3 + 1, n_4, k_{(3, n_3 + 1)}], n_1 + 1 \leq N_3,$$

$$[n_1, n_2, n_3, n_4 + 1, k_{(4, n_4 + 1)}], n_1 + 1 \leq N_4$$

On définit a l'arc qui connecte un parent $[n_1, \dots, n_L, k]$ à un enfant $[n'_1, \dots, n'_L, k']$ avec $k \neq k'$. Pour résoudre les contraintes (2.4) et (2.5) du problème formulé, on associe un poids w à chaque arc, celui-ci est défini par :

$$w(a) = \begin{cases} d & \text{si } l_k = l_{k'} \\ s & \text{si } c_{(r_k, r_{k'})} = 1, l_k \neq l_{k'} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

Il est important de souligner le fait que deux véhicules allant tout droit et se trouvant dans des voies opposées sont liés par un arc de poids nul. Autrement dit, aucun temps supplémentaire ne sera comptabilisé dans ce cas. Il en va de même pour n'importe quelle association de deux mouvements non conflictuels et provenant de voies différentes.

Le nombre de nœuds nécessaires à la création du graphe complet est donné par :

$$L \prod_{i=1}^L (N_i + 1) - \sum_{i=1}^{L-1} ((L - i) \varphi_i(\mathcal{N})) \quad (2.7)$$

Où $\mathcal{N} = \{N_1, \dots, N_L\}$ et $\varphi_i(\mathcal{N})$ est la somme des produits des éléments des i combinaisons de \mathcal{N} . Par exemple, pour $L = 3$, nous avons $\mathcal{N} = \{N_1, N_2, N_3\}$, $\varphi_1(\mathcal{N}) = N_1 + N_2 + N_3$ et $\varphi_2(\mathcal{N}) = N_1N_2 + N_1N_3 + N_2N_3$. Ainsi le nombre de sommets dans le graphe est $3(N_1 + 1)(N_2 + 1)(N_3 + 1) - 2(N_1 + N_2 + N_3) - (N_1N_2 + N_1N_3 + N_2N_3)$. Nous pouvons ainsi majorer le nombre de sommets par $L \prod_{i=1}^L (N_i + 1)$.

De plus le nombre de séquences de passage possibles en tenant compte des contraintes de précédence des véhicules dans une même voie est définie par :

$$\frac{(\sum_{i=1}^L N_i)!}{\prod_{i=1}^L (N_i)!} \quad (2.8)$$

A partir de la formulation du problème, il est maintenant nécessaire de présenter l'algorithme de résolution, basé sur la création et le parcours du graphe.

2.3.2 Algorithme

Pour décrire l'algorithme, nous introduisons la notion de rang. Chaque nouveau véhicule qui est ajouté à la séquence représente un nouveau rang. Ainsi le $j^{\text{ième}}$ rang est composé de tous les nœuds vérifiant $\sum_{i=1}^L n_i = j$. Le nombre de rangs qui composent le graphe est donc $N + 2$ en comptant le nœud initial et le nœud terminal.

On donne l'algorithme suivant:

1. Construction du nœud $[0, \dots, 0]$
2. Tant que $\sum_{i=1}^L n_i < N$ on effectue
 - a. Construction de tous les nœuds uniques (pas de doublon) du niveau,
 - b. Création des arcs et leur poids, entre les parents du niveau précédent et les nouveaux nœuds du niveau actuel
 - c. Pour chaque nœud du niveau

- i. Calcul pour chaque parent du temps d'évacuation de la séquence en fonction du temps d'évacuation du nœud et du poids de l'arc (équation (2.6)),
- ii. Choix du meilleur nœud parent, c'est-à-dire celui qui permet un temps d'évacuation minimum et enregistre la séquence et le temps d'évacuation correspondants,
- d. Destruction du niveau précédent (nœuds parents)

Une fois l'algorithme déroulé, il reste donc un nœud terminal qui contient la séquence optimale de passage des véhicules en termes de temps d'évacuation.

2.3.3 Discussion

Nous avons proposé une méthode exacte de résolution du problème permettant de minimiser le temps d'évacuation total grâce à la connaissance de l'arrivée de tous les véhicules. Malheureusement, cette méthode est trop coûteuse en termes de temps de calcul, mais également de capacité mémoire, puisque l'algorithme doit parcourir toutes les solutions du problème. En effet dans le cas d'un nombre quelconque de voies il s'agit d'un problème NP-difficile [121]. De plus, nous rappelons que dans la réalité, il n'est pas possible de connaître à l'avance l'arrivée de tous les véhicules.

La méthode SG n'est pas applicable en temps-réel pour les raisons évoquées précédemment. Cependant, elle peut servir de référence pour effectuer des comparaisons avec des méthodes temps-réel, de manière à valider ces dernières.

Dans la suite nous nous intéressons à la mise en place d'une méthode de régulation temps-réel. Celle-ci est basée sur une modélisation par Réseau de Petri (RP).

2.4 Modélisation Réseau de Petri

L'idée d'utiliser les Réseaux de Petri (RP) pour modéliser le trafic est relativement récent, on peut prendre par exemple l'approche proposée dans [122]. Depuis, d'autres méthodes ont été présentées, celles-ci s'appuient sur plusieurs types de RP tels que les RP hybrides, les RP colorés, les RP temporisés (RPT), etc.

Après avoir décrit le fonctionnement d'un RP classique, nous présenterons le modèle proposé sous forme de RPT avec multiplicateurs (RPTM). Grâce à ce modèle, nous proposons une stratégie de contrôle basée sur une fonction-objectif. Le modèle proposé a été présenté dans [123].

2.4.1 Introduction aux réseaux de Petri

On définit un Réseau de Petri (RP) par $N = (P, T, I, O, M_0)$ avec :

- $P = P_1, P_2, \dots, P_m$ est un ensemble fini de places (représentées par des cercles),
- $T = T_1, T_2, \dots, T_n$ est un ensemble fini de transitions (représentées par des segments),
- $I: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est une fonction d'entrée telle que $I(P_i, T_j)$ est le poids de l'arc qui connecte P_i à T_j ,

- $O: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ est une fonction de sortie telle que $O(P_i, T_j)$ est le poids de l'arc qui connecte T_j à P_i ,
- M_0 est le marquage initial qui associe zéro ou plusieurs jetons à chaque place.

De plus, $n \geq 0, m \geq 0, n + m \geq 1$ et $P \cap T = \emptyset$.

L'état d'un RP est défini par le nombre de jetons dans chaque place et est représenté par un vecteur $M = [M(P_1), M(P_2), \dots, M(P_m)]^T$. M est appelé le vecteur de marquage, avec $M(P_i)$ le nombre de jetons dans la place P_i . Une transition $T_j \in T$ est dite franchissable si et seulement si $M(P_i) \geq I(P_i, T_j), \forall P_i \in P$. Le déclenchement d'une transition franchissable T_j engendre le retrait d'un certain nombre de jetons dans les places d'entrée et l'ajout d'un certain nombre de jetons dans les places de sortie, en fonction du poids des arcs.

Lors du déclenchement de la transition T_j , le marquage initial $M_0(P_i)$ donne un nouveau marquage $M(P_i)$ grâce au processus :

$$M(P_i) = M_0(P_i) + O(P_i, T_j) - I(P_i, T_j) \quad (2.9)$$

Soit $R(M_0)$, l'ensemble des marquages qui peuvent provenir de M_0 . La matrice d'entiers, notée C , est appelée matrice d'incidence du RP, elle est de taille $m \times n$ et est définie par $C = O - I$ avec :

$$C_{ij} = O(P_i, T_j) - I(P_i, T_j) \quad (2.10)$$

Le marquage $M \in R(M_0)$ est atteint lorsqu'une séquence de déclenchement x est exécutée à partir de M_0 en satisfaisant l'équation :

$$M = M_0 + Cx \quad (2.11)$$

Avec $x: T \rightarrow \mathbb{N}$ le vecteur de séquence de déclenchement donné par :

$$x = [x_1, \dots, x_n]^T$$

x_j étant le nombre de fois que la transition T_j a été activée.

Un Réseau de Petri Temporisé avec Multiplicateurs (RPTM) est un Réseau de Petri Temporisé (RPT) avec des nombres associés aux arcs (multiplicateurs) permettant de modéliser de nombreux systèmes.

2.4.2 Modélisation RPTM d'une intersection

La modélisation RPTM proposée considère une intersection simple à quatre branches similaires. De plus, pour simplifier le modèle mathématique, nous considérons que tous les véhicules vont tout droit.

Il est d'abord nécessaire de modéliser une route, c'est-à-dire une branche de l'intersection. Ensuite nous présentons le modèle du contrôleur d'intersection qui est responsable de la distribution des droits de passage. En associant ce contrôleur avec quatre routes, nous obtenons ensuite un modèle complet.

2.4.2.1 Modélisation d'une route

On définit le modèle RPTM d'une route R_i ($i = 1,4$) (voir Figure 2.11). A ce stade, aucune notion de régulation n'est présente. Les différentes transitions permettent de représenter le passage de chaque véhicule à travers trois zones, c'est-à-dire la zone de stockage, puis la zone de conflit, et enfin la zone de sortie (voir Tableau 2.2). La place P_i est temporisée pour appliquer un temps de sécurité d entre deux véhicules successifs de la même voie. C'est-à-dire qu'ils sont séparés au minimum par un espace / temps d lorsqu'ils traversent la zone de conflit.

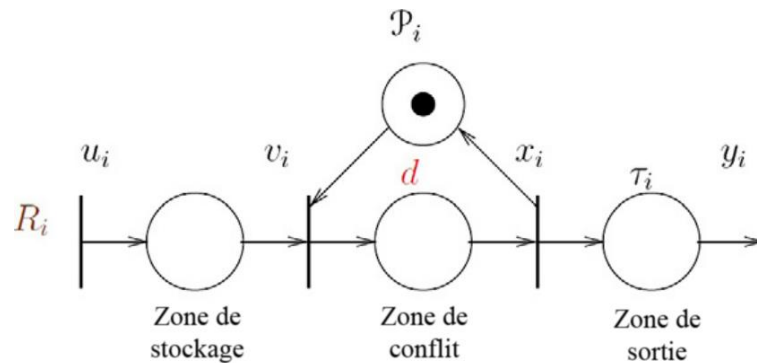


Figure 2.11 - Modèle RP d'une route

Transition	Signification
$u_i(t)$	Nombre de véhicules ayant accédé à la zone de stockage au temps t
$v_i(t)$	Nombre de véhicules ayant accédé à la zone de conflit au temps t
$x_i(t)$	Nombre de véhicules ayant accédé à la zone de sortie au temps t
$y_i(t)$	Nombre de véhicules ayant quitté la zone de sortie au temps t

Tableau 2.2 - Signification des transitions du RP d'une route

2.4.2.2 Contrôleur d'intersection

Le contrôleur d'intersection représente l'état de la signalisation (voir Figure 2.12). Ce modèle est basé sur l'utilisation de deux types de transitions clés (voir Tableau 2.3). Nous pouvons décrire le fonctionnement du contrôleur de la manière suivante :

- La place P_{α_i} est une place immédiate (sans temporisation) qui permet d'autoriser les véhicules se déplaçant dans le même axe de circulation F_i , à traverser la zone de conflit (simultanément). P_{α_1} autorise les mouvements des véhicules appartenant aux routes R_1 et R_2 en même temps, tandis que P_{α_2} autorise les mouvements des véhicules appartenant aux routes R_3 et R_4 en même temps,
- La place P_{i-j} est temporisée pour garder le jeton, de manière à représenter le temps de sécurité s quand le droit de passage passe de l'axe F_i à l'axe F_j , avec $i \neq j$ et $i, j \in 1,2$,
- La présence d'un multiplicateur 2 sur un arc signifie qu'un poids est ajouté. Par exemple, la transition v_{1-2} peut être activée seulement si deux jetons sont disponibles dans la place d'entrée P_{α_1} . Ainsi, si on active la transition v_{1-2} , on enlève les deux

jetons de la place d'entrée P_{α_1} et on ajoute un jeton dans la place de sortie P_{1-2} . Ensuite, en activant la transition x_{1-2} on doit retirer le jeton de la place d'entrée P_{1-2} et ajouter deux jetons dans la place de sortie P_{α_2} . Ce poids a pour but d'empêcher que des véhicules provenant d'axes conflictuels obtiennent le droit de passage en même temps.

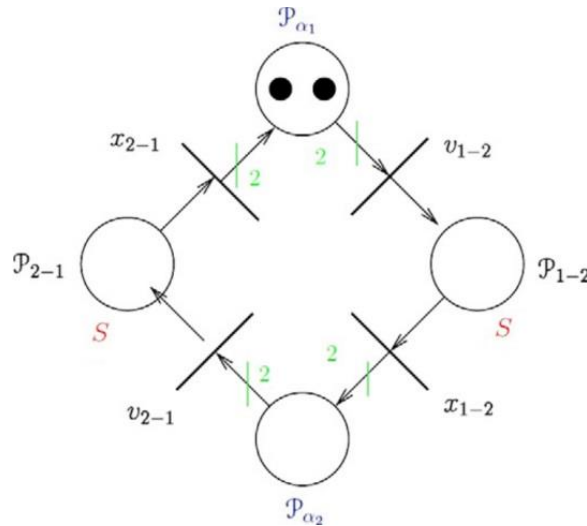


Figure 2.12 – Modèle RP du contrôleur d'intersection

Transition	Signification
v_{i-j}	Début du temps de sécurité s
x_{i-j}	Fin du temps de sécurité s

Tableau 2.3 - Signification des transitions du RP du contrôleur d'intersection

2.4.2.3 Modèle complet

En associant un modèle de route pour chaque entrée de l'intersection avec un modèle de contrôleur d'intersection nous proposons un modèle complet (voir Figure 2.13). Celui-ci est composé de trois sous-réseaux, séparés par des tirets sur le schéma. Les parties haute et basse du modèle représentent respectivement les axes de circulation F_1 (Routes R_1 et R_2) et F_2 (Routes R_3 et R_4). La partie centrale du modèle est entièrement dédiée à la régulation de l'intersection et représente l'état de la signalisation. Les places P_{α_i} permettent de verrouiller un axe de manière à empêcher l'activation simultanée de (v_1, v_2) et (v_3, v_4) . On remarque qu'il existe deux conflits, le premier est entre v_1, v_2 et v_{1-2} , et le second entre v_3, v_4 et v_{2-1} . Le problème revient donc à déterminer la séquence d'activation de ces transitions.

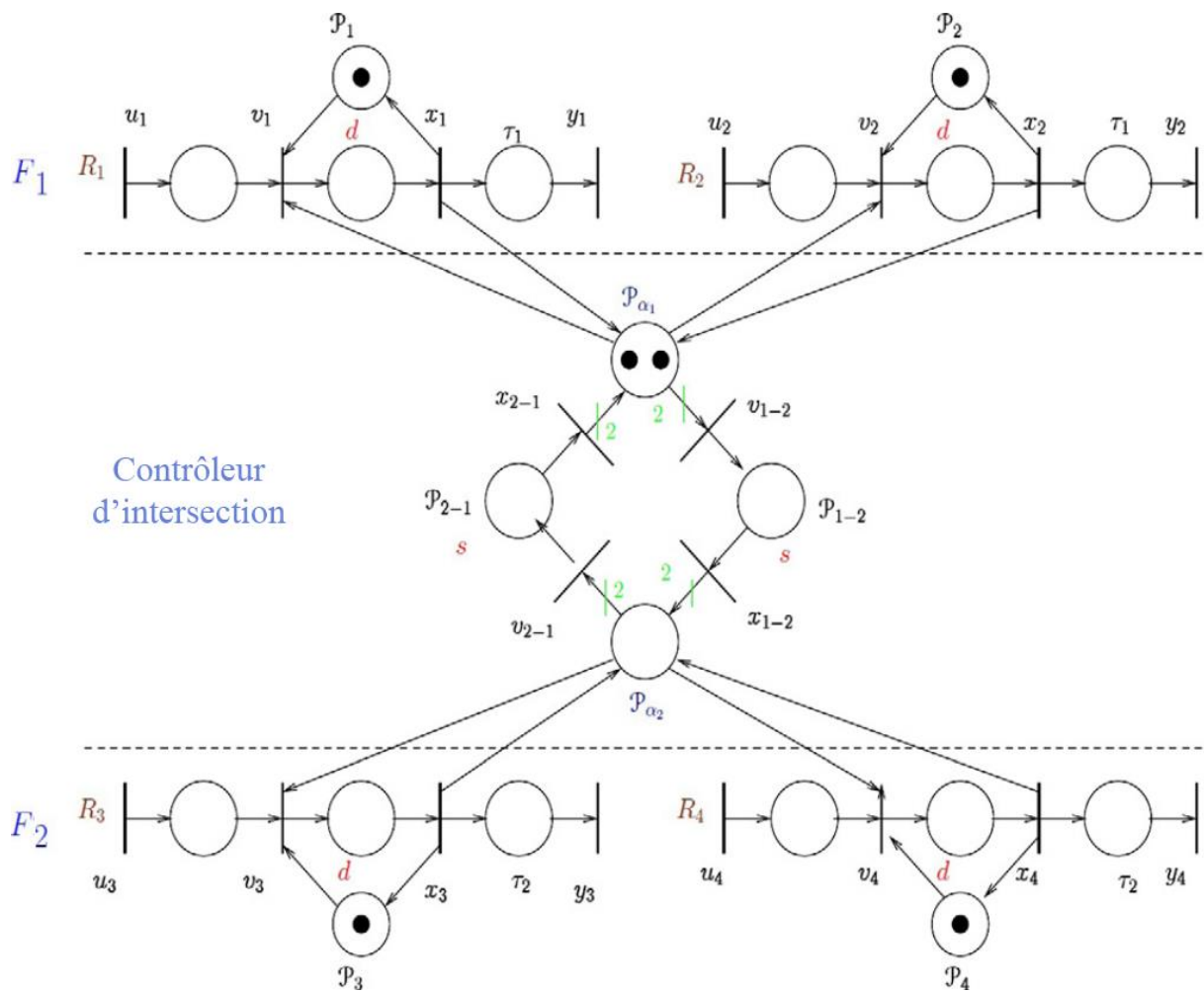


Figure 2.13- Modèle réseau de Petri complet de l'intersection

2.4.2.4 Etude des contraintes du système

On s'intéresse maintenant aux contraintes du système, de manière à prouver le bon fonctionnement de la distribution des droits de passage. L'objectif est double. Nous souhaitons dans un premier temps garantir que deux voies en conflit ne peuvent pas posséder l'autorisation au même moment pour une question de sécurité. Dans un deuxième temps, on s'intéresse à la question de l'efficacité, ainsi on vérifie qu'il est possible d'activer en même temps des voies qui sont parallèles, c'est-à-dire des voies qui appartiennent au même axe de circulation F_i .

Lemme 1 (Contraintes). *Nous considérons la ressource P_{α_i} du modèle précédemment défini (voir Figure 2.13). A chaque temps t , les compteurs des transitions d'entrée et de sortie $v_i(t)$ et $x_i(t)$, ainsi que les compteurs des transitions correspondants au début et à la fin de la configuration de la ressource P_{α_i} , notés respectivement $v_{j-i}(t)$ et $x_{i-j}(t)$, satisfont l'inégalité suivante :*

$$\sum_{j=2i-1}^{2i} \{v_j(t) - x_j(t)\} + \sum_{j \neq i, j=1}^n \{M_0(P_{\alpha_i}) \times v_{i-j}(t) - M_0(P_{\alpha_i}) \times x_{j-i}(t)\} \leq M_0(P_{\alpha_i}) \quad (2.12)$$

Avec n le nombre de ressources partagées P_{α_i} , et $M_0(P_{\alpha_i})$ le marquage initial de la place P_{α_i} .

Preuve. Par définition, les transitions v_i et v_{i-j} , $\forall i$, sont activées si et seulement si au moins deux jetons sont présents dans la place correspondante P_{α_i} . En utilisant les équations (2.9) et (2.11), le marquage instantané de la place P_{α_i} est donné par :

$$M_t(P_{\alpha_i}) = M_0(P_{\alpha_i}) + \sum_{j=2i-1}^{2i} x_j(t) - \sum_{j=2i-1}^{2i} v_j(t) + \sum_{i \neq j, i=1}^n M_0(P_{\alpha_i}) \times x_{i-j}(t) - \sum_{i \neq j, i=1}^n M_0(P_{\alpha_i}) \times v_{j-i}(t) \quad (2.13)$$

Mais par définition: $\forall t, M_t(P_{\alpha_i}) \geq 0$, ainsi le lemme est prouvé.

Remarque 1. Nous remarquons que ce lemme est très intéressant pour représenter les contraintes du système. En effet, il nous donne une relation qui utilise uniquement les compteurs des transitions du contrôleur d'intersection et des transitions qui composent les zones de conflit des différentes routes. De plus, la preuve de la contrainte (2.12) nous permet de vérifier qu'une transition v_{i-j} n'est activable qu'en présence de deux ressources libres et une seule place P_{α_i} peut posséder celles-ci à un moment donné. Nous pouvons donc conclure que d'une part il est bien impossible d'autoriser deux axes conflictuels au même moment, et d'autre part la présence de deux ressources libres permet d'activer simultanément deux voies parallèles d'un même axe de circulation.

2.4.3 Stratégie de contrôle

Rappelons que dans la littérature, l'objectif est d'évacuer les véhicules le plus rapidement possible de l'intersection, c'est-à-dire d'augmenter le débit au niveau des sorties. A cause des contraintes de temps de calcul, nous devons trouver des règles simples et locales qui mènent à un comportement global et complexe. Ainsi, la fonction-objectif doit être traitée instantanément. La somme des longueurs des files d'attente est un moyen intéressant de traiter le problème. Plus de détails à propos de cette relation sont donnés dans [7,124].

Le scénario du véhicule coopératif permet de distribuer l'autorité à chaque véhicule en suivant un certain protocole. Ce scénario donne l'autonomie aux véhicules puisqu'ils contribuent à la décision de traverser ou non l'intersection. Dans le but de trouver un moyen satisfaisant de contrôler l'intersection, nous utilisons le modèle mathématique qui décrit le comportement du RPTM présenté précédemment. Nous pouvons alors écrire le système des contraintes du modèle:

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall i \in \{1,2,3,4\}, v_i(t) \geq 0, u_i(t) \geq 0, v_{i-j}(t) \geq 0, x_i(t) \geq 0, x_{i-j}(t) \geq 0, \\ \quad \quad \quad v_i(t) \leq u_i(t), \\ v_1(t) + v_2(t) + (2 \times v_{1-2}(t)) \leq 2 + x_1(t) + x_2(t) + (2 \times x_{2-1}(t)), \\ \quad \quad \quad v_3(t) + v_4(t) + (2 \times v_{2-1}(t)) \leq x_3(t) + x_4(t) + (2 \times x_{1-2}(t)), \\ x_1(t) = v_1(t-d), x_2(t) = v_2(t-d), x_3(t) = v_3(t-d), x_4(t) = v_4(t-d), \\ \quad \quad \quad x_{1-2}(t) = v_{1-2}(t-s), x_{2-1}(t) = v_{2-1}(t-s). \end{array} \right. \quad (2.14)$$

Remarque 2. En analysant le système des contraintes, on remarque que pour $t < 0$, aucun véhicule ne se trouve dans l'intersection, comme illustré dans le modèle RP. Par souci de lisibilité, et sans perte de généralité, cette considération sera gardée pour la suite de cette partie, ainsi que le fait que tous les compteurs de transition sont nuls pour $t < 0$. En d'autres termes, aucune transition n'a encore été activée avant $t = 0$.

2.4.3.1 Etude des événements

On définit $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$ et $q_4(t)$, respectivement le nombre de véhicules en attente sur les routes R_1, R_2, R_3 et R_4 au temps t . Nous considérons la fonction J pour représenter le nombre total de véhicules en attente dans les entrées de l'intersection au temps t , celle-ci est définie par $J = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + q_4(t)$. Dans cette fonction, nous considérons que toutes les routes de l'intersection ont le même poids, puisque la stratégie de régulation ne tient pas compte de routes prioritaires, ni de mesures des débits antérieurs. Il est important de signaler que nous ne considérons pas pour l'instant de limite supérieure au nombre de véhicules présents dans les files d'attente. En effet, la stratégie de contrôle considère ici une intersection isolée. La borne minimale est cependant incluse dans la seconde inégalité du système de contraintes (2.14).

Nous rappelons que l'objectif de la stratégie de contrôle est de réduire instantanément les files d'attente au moment où les véhicules arrivent dans l'intersection. Autrement dit, l'objectif est de minimiser le nombre total de véhicules en attente, c'est-à-dire en minimisant la fonction-objectif J . La proposition suivante nous donne une propriété intéressante de la solution optimale permettant de minimiser J .

Proposition 1. Sous la condition qu'au moins un véhicule se trouve dans chaque voie de l'intersection, la solution optimale de $\min J(t)$ minimise le changement du droit-de-passage entre les axes de circulation F_1 et F_2 .

Preuve. Nous définissons $q_1(t), q_2(t), q_3(t)$ et $q_4(t)$, respectivement le nombre de véhicules en attente sur les routes R_1, R_2, R_3 et R_4 au temps t . L'objectif de la régulation est de minimiser le nombre total de véhicules en attente dans toutes les voies, c'est-à-dire minimiser $J = q_1(t) + q_2(t) + q_3(t) + q_4(t)$ pour tout temps t .

Nous considérons que le modèle RPTM décrit précédemment considère le fonctionnement du RP à la vitesse maximale. Autrement dit, si une route autorisée est vide, un changement d'axe de circulation s'effectue. Cependant, tant qu'au moins un véhicule se trouve dans chaque voie, il existe un conflit. De manière formelle, la troisième et la quatrième inégalité du système de contraintes (2.14) deviennent des égalités. Ainsi, à partir de la troisième inégalité, on a :

$$v_1(t) + v_2(t) + 2 \times v_{1-2}(t) = 2 + v_1(t-d) + v_2(t-d) + 2 \times v_{2-1}(t-s) \quad (2.15)$$

En fonction de la définition $q_i(t) = u_i(t) - v_i(t)$ pour $i = 1, 2$. En injectant dans (2.15) on obtient :

$$2 = u_1(t) - q_1(t) + u_2(t) - q_2(t) - u_1(t-d) + q_1(t-d) - u_2(t-d) + q_2(t-d) + 2 \times (v_{1-2}(t) - v_{2-1}(t-s)) \quad (2.16)$$

Comme $\Delta q_i(t) = q_i(t) - q_i(t-d), \Delta u_i(t) = u_i(t) - u_i(t-d), i = 1, 2$, l'équation (2.16) peut être écrite comme suit :

$$2 = \Delta u_1(t) - \Delta q_1(t) + \Delta u_2(t) - \Delta q_2(t) + 2 \times (v_{1-2}(t) - v_{2-1}(t-s)) \quad (2.17)$$

A partir de la remarque 2, on note que $q_i(t) = \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t}{d} \rfloor} \Delta q_i(t-j \times d)$ et $u_i(t) = \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t}{d} \rfloor} \Delta u_i(t-j \times d)$ avec $i = 1, 2$ et $[x]$ est la partie entière de x . Nous obtenons depuis l'équation (2.17), l'égalité suivante :

$$q_1(t) + q_2(t) = u_1(t) + u_2(t) + 2 \times \left(\sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t}{d} \rfloor} (v_{1-2}(t-j \times d) - v_{2-1}(t-s-j \times d)) - \left\lfloor \frac{t}{d} \right\rfloor - 1 \right) \quad (2.18)$$

La même analyse pour les routes R_3 et R_4 peut être appliquée pour la quatrième inégalité de (2.14) :

$$q_3(t) + q_4(t) = u_3(t) + u_4(t) + 2 \times \left(\sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t}{d} \rfloor} (v_{2-1}(t-j \times d) - v_{1-2}(t-s-j \times d)) \right) \quad (2.19)$$

Ainsi la fonction-objectif J devient :

$$\begin{aligned}
J = \sum_{i=1}^4 q_i(t) &= \sum_{i=1}^4 u_i(t) + 2 \\
&\times \left(\sum_{j=0}^{\lfloor \frac{t}{d} \rfloor} ((v_{1-2}(t - j \times d) - v_{1-2}(t - s - j \times d)) \right. \\
&\quad \left. + (v_{2-1}(t - j \times d) - v_{2-1}(t - s - j \times d)) - \lfloor \frac{t}{d} \rfloor - 1) \right)
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Comme $v_{1-2}(t)$ et $v_{2-1}(t)$ sont des compteurs de transitions, ils augmentent de manière monotone, donc ils augmentent la fonction-objectif J .

Remarque 3. La proposition 1 montre que changer la distribution des droits de passage d'un axe de circulation vers un autre doit être évité le plus possible. Ainsi, on obtient une propriété intéressante de la solution optimale dans le cas général. D'un point de vue pratique, en fonction du critère retenu, la proposition nous apprend qu'il est préférable de garder la période de vert pour tout véhicule qui suit son prédécesseur (dans la même voie R_i), à une distance temporelle inférieure ou égale à d avec $i = 1,2,3,4$. Ceci est vrai pour le cas symétrique dans lequel chaque route est occupée par au moins un véhicule prêt à traverser l'intersection, ou dans le cas où les routes parallèles sont vides. Dans la suite, on étend les règles au cas général, puisque le champ de vision du contrôleur est limité au temps actuel t . En effet, en faisant la même analyse donnée dans la preuve, on peut facilement obtenir qu'à tout temps t , J est incrémenté par le nombre de routes dans lesquelles on refuse de continuer à autoriser le véhicule suiveur.

2.4.3.2 Implémentation de la stratégie de régulation

A partir de la proposition 1, nous donnons l'approche abstraite suivante (sans considérer le serveur) : Chaque véhicule communique avec son suiveur, qui se trouve dans la même voie. Tout véhicule qui se trouve à une distance de son prédécesseur inférieure ou égale à d constitue un convoi avec ce dernier. Les véhicules d'un même convoi traversent l'intersection ensemble sans interruption.

Le modèle RPTM suppose que l'intersection est tout le temps occupée par des véhicules, ou dans un état de rouge intégral, il ne considère pas le cas où un véhicule se trouve à une distance supérieure à d . Ce qui signifie que l'intersection est dans un état d'attente. Dans ce cas, nous proposons une règle simple pour distribuer le droit de passage. Le plus proche obtient l'autorisation de traverser.

En gardant l'ordre d'arrivée des véhicules, nous proposons l'approche suivante :

Approche

1. Un véhicule obtient le droit de passage si une des conditions suivantes est satisfaite :
 - a. Le véhicule est arrivé premier dans l'intersection.

- b. Le véhicule se trouve à une distance inférieure ou égale à d d'un véhicule déjà autorisé (dans la même voie).
 - c. Le mouvement du véhicule n'est en conflit avec aucun véhicule déjà autorisé, et le véhicule est plus proche de la zone de conflit que le dernier véhicule autorisé (véhicule suiveur).
2. Sinon, le dernier véhicule qui quitte l'intersection envoie le droit de passage au véhicule le plus proche. S'il y a deux véhicules avec la même distance temporelle, le vert est envoyé au véhicule qui appartient à la même voie.
 3. Sinon, pour tout autre cas le véhicule a le rouge.

Remarque 4. Nous notons que l'approche de régulation :

- N'est pas gourmande en temps de calcul. En outre, elle ne nécessite pas de temps d'attente pour chercher des informations à propos de tous les véhicules dans l'intersection avant de décider la séquence de passage,
- Est proche de la méthode classique "clearing policy". Dans la suite du chapitre, nous appellerons notre approche de régulation Politique d'évacuation distribuée (PED).

Exemple

De manière à illustrer le processus de régulation, nous étudions un exemple (voir Figure 2.14).

Deux véhicules se trouvent sur la route R_1 , deux véhicules sur la route R_2 , un véhicule sur la route R_3 ainsi que deux véhicules sur la route R_4 . Le but de la régulation est de former une séquence de passage des véhicules dans l'intersection. Cette séquence a pour objectif de réduire instantanément la longueur des files d'attente. Pour cet exemple, nous considérons $d = 2$ et $s = 3$.

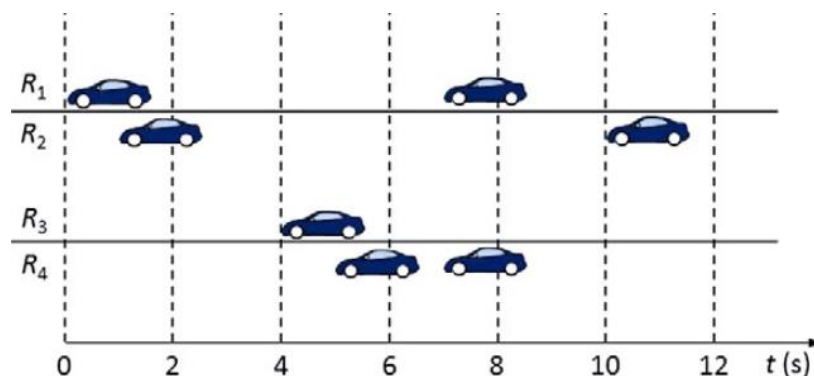


Figure 2.14 - Exemple de séquence d'arrivée des véhicules

Observons maintenant la solution trouvée grâce à la méthode PED (voir Figure 2.15). Le premier véhicule de la route R_1 traverse l'intersection puisqu'il est le premier arrivé au niveau de la zone de conflit. Le premier véhicule se trouvant sur la route R_2 obtient également le droit de passage puisqu'il est le plus proche de la zone de conflit et qu'il n'est pas en conflit avec le véhicule déjà autorisé. Une fois les deux premiers véhicules sortis de l'intersection, les droits de passage sont distribués simultanément aux trois véhicules se trouvant dans les routes

R_3 et R_4 , puisqu'ils composent un convoi. Après la sortie du groupe de véhicules, l'intersection laisse traverser ensemble les deux derniers véhicules des routes R_1 et R_2 .

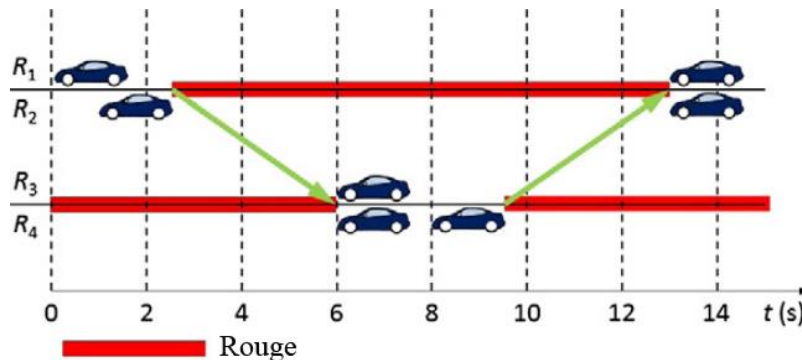


Figure 2.15 - Résolution de l'exemple

On remarque facilement qu'il s'agit de la solution optimale pour faire sortir tous les véhicules dans un temps minimal. Cependant le second véhicule de la route R_4 soulève une question de symétrie (voir remarque 3), puisqu'il n'y a aucun véhicule prêt à traverser sur la route R_3 au temps $t = 8s$. Supposons maintenant la présence d'un véhicule supplémentaire sur la route R_3 prêt à traverser au temps $t = 14s$. La meilleure solution consiste alors à repousser le passage du dernier véhicule de la route R_4 . Cependant, le contrôleur doit prendre une décision en temps-réel. En effet, l'intersection n'est pas informée de l'arrivée des derniers véhicules. Pour cette raison, nous gardons les précédentes règles. Dans la suite du chapitre, les simulations vont comparer la PED avec la séquence optimale que nous appelons Solution Globale (SG), dans laquelle on suppose que le contrôleur d'intersection connaît au préalable toutes les arrivées des véhicules.

2.4.4 Discussion

Nous avons présenté un modèle mathématique basé sur l'utilisation d'un RPTM, permettant de réguler une intersection simple à quatre branches dans laquelle nous limitons le mouvement des véhicules (mouvement tout-droit exclusivement). Le modèle a été validé par la preuve que, d'une part le contrôleur d'intersection ne permet pas le passage de véhicules conflictuels simultanément, et d'autre part il permet d'autoriser en même temps des véhicules se trouvant dans des voies parallèles.

Une stratégie de contrôle basée sur la minimisation du temps d'évacuation a été proposée. L'exemple présenté confirme l'intérêt de former des convois de véhicules, en partant de l'hypothèse $d < s$. Nous confirmons également le fait que la séquence de passage qui résulte de la connaissance des véhicules actuellement dans l'intersection, peut être légèrement différente en ayant connaissance au préalable de l'arrivée de tous les véhicules. C'est pour cette raison qu'une comparaison entre la méthode temps-réel proposée et la méthode SG présentée dans la partie précédente, devrait nous permettre de valider l'approche de régulation.

2.5 Simulations et résultats

Les simulations ont pour principal avantage de pouvoir tester une situation qui comprend de nombreuses entités mobiles, de manière à tirer des observations qui ne sont pas possibles en

tests réels, compte tenu des limitations matérielles. Cependant il est important de prendre en compte au mieux les problématiques réelles telles que les problèmes liés aux différents systèmes (système de communication, système de positionnement, capteurs, etc.). La mise en place des tests de simulation nécessite donc un environnement adéquat. Nous avons choisi de travailler avec un simulateur de trafic en 3D, permettant de développer un système de régulation coopératif spécifique à nos besoins.

Pour assurer la validation des tests, nous choisissons deux types d'infrastructure d'intersection. De plus, les simulations sont lancées en suivant plusieurs méthodes de régulation, les Feux Tricolores (FT), la politique temps-réel SVAC-PED et la méthode de résolution exacte appelée Solution Globale (SG) qui sera simulée sous le protocole SVAC (SVAC-SG).

Une première comparaison est présentée entre toutes les méthodes sur une intersection classique. Le but est double. Le tout premier objectif, et le plus important consiste à confirmer que le protocole est sécurisé, c'est-à-dire qu'il permet d'éviter toute collision. Le deuxième objectif considère cette fois la question "optimisation". Nous souhaitons d'une part vérifier que les méthodes SVAC-SG et SVAC-PED apportent une amélioration significative par rapport aux feux tricolores. D'autre part, les résultats doivent montrer que la méthode temps-réel est relativement proche de la méthode exacte pré-calculée.

Dans une deuxième comparaison plus approfondie, nous souhaitons valider la politique temps-réel SVAC-PED par rapport aux feux tricolores à travers de nombreux cas de figures. Nous nous intéressons en particulier au type d'intersection, aux débits du trafic, mais également à l'homogénéité de ces débits.

2.5.1 Simulateur de trafic

Les simulations sont réalisées sur un simulateur de trafic en 3D développé par la société Voxelia (www.voxelia.com), pour la possibilité d'intégrer de nouvelles politiques de régulation. L'environnement 3D permet de représenter de manière réaliste une intersection, voire un réseau d'intersections (voir Figure 2.16). Chaque véhicule est simulé individuellement grâce à un modèle basé sur le suivi de véhicule, mais également sur l'adaptation de la trajectoire et de la vitesse en fonction des routes (virages).



Figure 2.16 - Simulateur 3D

Nous avons développé un module permettant de gérer la régulation du trafic grâce à nos propres politiques et algorithmes. Ce module inclue une représentation simplifiée d'une architecture réseau permettant de simuler la communication sans-fil entre les véhicules et l'infrastructure, ainsi qu'entre les véhicules. Le système de communication est basé sur plusieurs paramètres permettant de simuler un délai moyen de communication. Ainsi, il est possible de reproduire des conditions assez proches de la réalité. Pour la partie positionnement, le module simule un système GPS capable de fournir une seule fois par seconde une position. Un véhicule doit donc estimer sa position entre deux positions GPS grâce à sa vitesse. Nous supposons également la présence d'autres capteurs tels que des radars frontaux permettant d'obtenir une position assez précise grâce notamment à la mesure de la distance inter-véhiculaire.

2.5.2 Intersections étudiées

Nous choisissons d'étudier deux architectures d'intersection relativement différentes pour permettre d'étendre les comparaisons (voir Figure 2.17).

Ce choix est basé sur la comparaison entre plusieurs critères :

- Taille de la zone de conflit,
- Nombre de voies en entrée et en sortie,
- Nombre de conflits et répartition entre les mouvements,
- Présence ou non de plusieurs mouvements dans une même voie (contrainte de priorité).

Ainsi la première architecture est classique (voir Figure 2.17 (A)), l'intersection est composée de quatre branches, permettant chacune d'effectuer trois mouvements : tout-droit, tourne-à-droite, tourne-à-gauche. Les douze mouvements possibles accèdent à quatre sorties. Le deuxième type d'intersection est composé de douze entrées et douze sorties (voir Figure 2.17 (B)). Ainsi chaque voie ne permet qu'un seul mouvement. Autrement dit, chaque sortie correspond à une seule entrée.

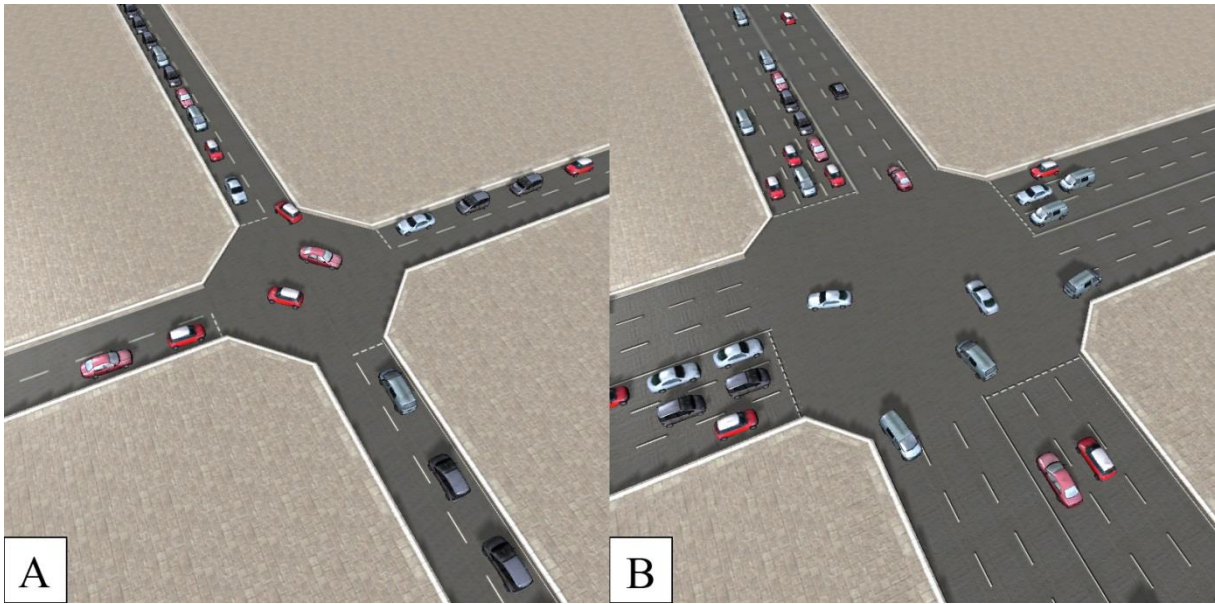


Figure 2.17 - Intersections étudiées

2.5.3 Méthodes de régulation étudiées

Les comparaisons qui suivent sont basées sur trois méthodes de régulation. Nous avons choisi les feux tricolores (FT), la politique SVAC associée à la méthode d'optimisation temps-réel PED (SVAC-PED), ainsi qu'à la méthode d'optimisation offline SG (SVAC-SG).

2.5.3.1 Méthode de régulation FT

Pour la méthode FT, nous évaluons des temps de cycle et des temps de phases selon la formule classique présentée dans [2]. L'auteur propose de calculer le temps de cycle optimal de la manière suivante :

$$C_{optim} = \frac{1.5L + 5}{1.0 - \sum_{i=1}^n Y_i} \quad (2.21)$$

Avec L le temps total perdu pendant le cycle, n le nombre de groupes de voies critiques et Y_i le débit du groupe de voies critiques i .

Dans le cas d'une distribution non homogène du trafic sur les voies d'entrée d'une intersection, la division du temps de cycle entre les phases se fait de manière proportionnelle par rapport aux débits générés.

2.5.3.2 Méthode de régulation SVAC-PED

La méthode SVAC-PED est appliquée comme elle a été décrite précédemment, c'est-à-dire que les arrivées des véhicules sont traitées au fur et à mesure au cours de la génération de ceux-ci. Lors de l'exécution de la simulation, le serveur lance l'algorithme d'ordonnancement en fonction des différentes requêtes d'entrée et de sortie des véhicules, de manière à générer en temps-réel une séquence de passage optimisée grâce à la formation de convois de véhicules. Le contrôleur d'intersection distribue au fur et à mesure les droits de passage en tenant compte de la séquence.

2.5.3.3 Méthode de régulation SVAC-SG

Pour la méthode SVAC-SG, on calcule la séquence de passage des véhicules au préalable en ayant connaissance de toutes les arrivées, grâce à l'algorithme de programmation dynamique présenté précédemment. Nous soulignons que cette étape peut prendre quelques secondes à plusieurs minutes en fonction du nombre de véhicules. Une fois la séquence de passage générée (solution optimale), celle-ci est appliquée strictement en simulation. C'est-à-dire qu'une fois la simulation lancée, le serveur n'exécute aucun algorithme d'ordonnancement, mais se contente de respecter l'ordre de distribution pré-calculé pour distribuer les droits de passage. Il est important de souligner qu'un calibrage est nécessaire pour évaluer les paramètres d et s en fonction du type d'intersection. Ainsi on vérifie que la solution est en effet proche de la solution optimale pour l'intersection testée.

2.5.4 Méthode de comparaison

Pour chaque test, nous générons aléatoirement une séquence de génération de N véhicules. Cette séquence ne doit pas être confondue avec la séquence de passage des véhicules qui est déterminée dans les méthodes de régulation. Chaque véhicule de la séquence devra être toujours créé à un temps donné pour un chemin connu. Ainsi, pour chaque nouvelle séquence, on peut comparer les différentes politiques de manière cohérente, puisque les dates d'arrivée et les trajets sont identiques. De plus, pour chaque comparaison, plusieurs séquences sont créées pour obtenir de la diversité, ensuite la moyenne des résultats est calculée.

La génération aléatoire de la séquence se base sur plusieurs paramètres :

- Débit de trafic local (voie d'entrée) : il détermine la fréquence moyenne de génération des véhicules pour une voie donnée. Il est exprimé en véhicules par seconde (v/s) et est noté f_i avec i l'indice de la voie d'entrée,
- Débit de trafic global (intersection) : il détermine la fréquence moyenne de génération des véhicules pour toute l'intersection. Il est donné par $f = \sum_{i=1}^E f_i$ avec E le nombre de voies d'entrée de l'intersection.
- Probabilité de mouvement : elle définit, pour chaque voie d'entrée, la probabilité pour un véhicule de tourner à droite, la probabilité de tourner à gauche et la probabilité de continuer tout droit. Ces probabilités sont notées respectivement p_d, p_g et p_c avec $p_d + p_g + p_c = 1$.

2.5.5 Comparaison préalable

Nous rappelons que cette comparaison devrait montrer d'une part la possibilité d'améliorer la fluidité du trafic par rapport aux feux tricolores grâce à la régulation coopérative, et d'autre part que la méthode temps-réel SVAC-PED est proche de la solution optimale SVAC-SG. Une partie des résultats qui suivent ont été présentés dans [118].

Pour la méthode des feux tricolores, on souhaite vérifier également la différence entre une régulation à deux phases et une régulation à quatre phases, en considérant le fait que l'intersection comporte quatre voies d'entrée. Nous soulignons le fait que le temps de cycle ne change pas entre les deux méthodes, uniquement le temps et la répartition des phases.

2.5.5.1 Paramètres

Les tests sont réalisés sur une intersection simple à quatre branches (voir Figure 2.17 (A)).

Le paramètre N qui définit le nombre de véhicules qui doivent être générés est fixé à 80. En effet, la capacité mémoire de l'ordinateur utilisé ne permet pas d'exécuter l'algorithme de recherche de la séquence optimale sur un échantillon plus important.

Pour tester les différents niveaux de trafic, la génération des véhicules comporte plusieurs étapes avec un débit f qui varie. Nous nous intéressons en particulier à un pic de trafic en milieu de simulation. Les phases de génération en fonction du temps t sont les suivantes :

- Etape 1 : $t \in [0; 100[$, $f = 0.28 \text{ v/s}$ donc $f_i = 0.07 \text{ v/s}$, $\forall i \in E$,
- Etape 2 : $t \in [100; 150[$, $f = 0.78 \text{ v/s}$ donc $f_i = 0.195 \text{ v/s}$, $\forall i \in E$,
- Etape 3 : $t \in [150; 188]$, $f = 0.34 \text{ v/s}$ donc $f_i = 0.085 \text{ v/s}$, $\forall i \in E$.

Avec t le temps en secondes. Nous retrouvons un débit moyen d'environ 0.464 v/s , correspond à $1\,670 \text{ v/h}$.

De plus les probabilités moyennes de mouvement qui résultent des séquences générées aléatoirement ont donné $p_d = 0.28$, $p_g = 0.34$, $p_c = 0.38$.

2.5.5.2 Résultats

Le premier graphique s'intéresse au nombre de véhicules dans l'intersection au cours du temps (voir Figure 2.18), tandis que le second s'intéresse au temps perdu moyen des véhicules au cours du trajet (voir Figure 2.19). Le calcul du temps perdu est basé sur l'estimation du temps de trajet d'un véhicule entre sa génération et sa destruction. Ainsi, un temps perdu nul signifie qu'aucun véhicule ne ralentit lors de son parcours. Un véhicule qui s'arrête pendant t secondes perd donc au moins ce temps, plus un temps supplémentaire pour ralentir avant l'intersection puis pour accélérer au moment de traverser.

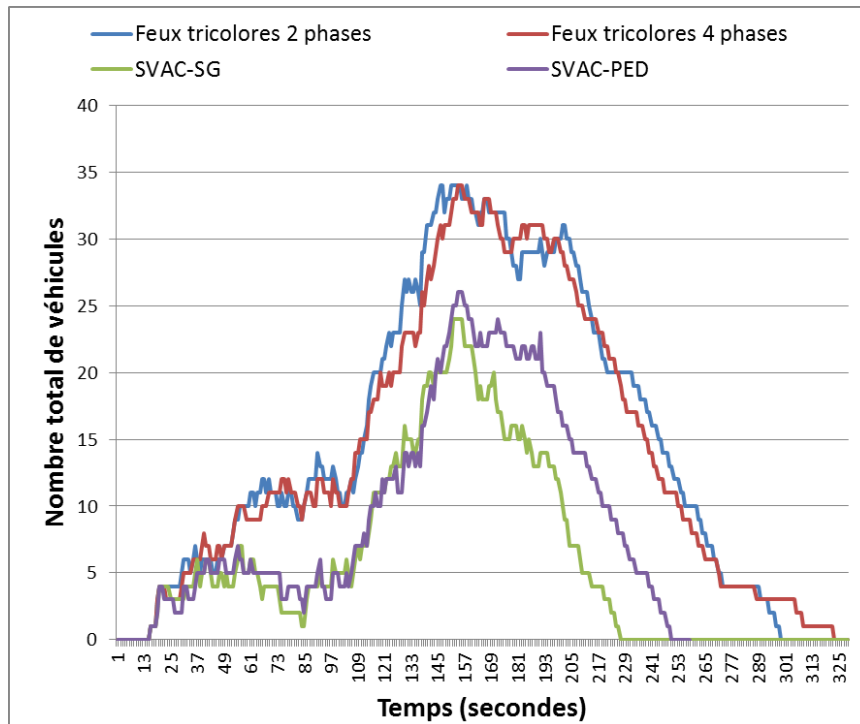


Figure 2.18 – Comparaison du nombre de véhicules pour FT / SVAC-PED / SVAC-SG

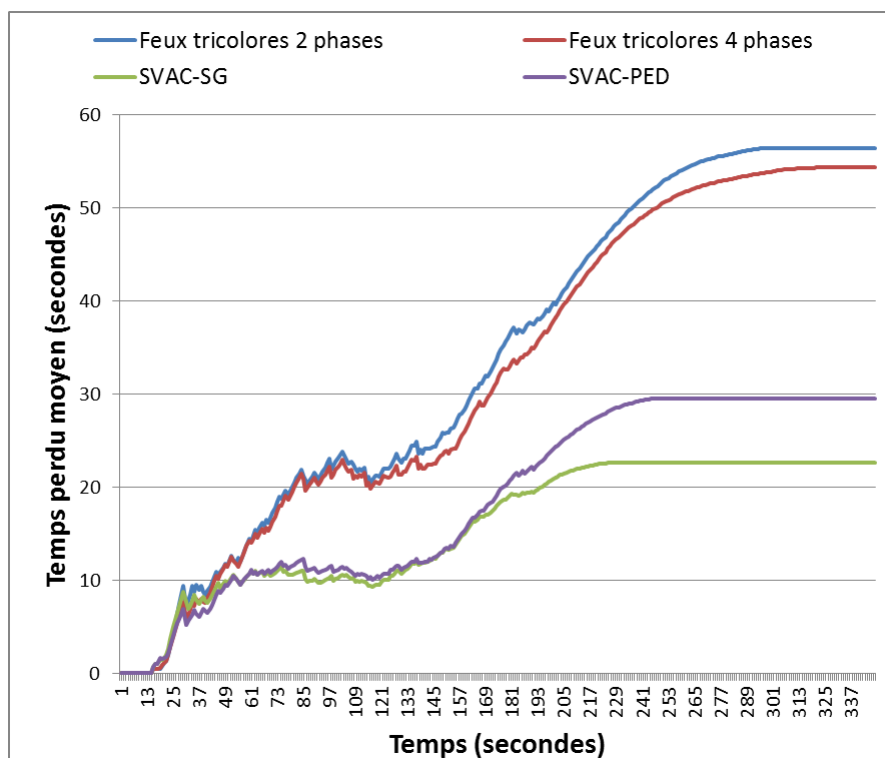


Figure 2.19 - Comparaison du temps perdu pour FT / SVAC-PED / SVAC-SG

L'analyse des courbes permet de tirer plusieurs observations importantes :

- Le nombre de phases définies pour la gestion des feux tricolores n'influence pas de manière significative l'efficacité de l'intersection,

- Les méthodes SVAC-SG et SVAC-PED présentent un net avantage par rapport à la régulation par feux tricolores, en évacuant tous les véhicules au moins 50s plus tôt. De plus, le nombre de véhicules dans l'intersection atteint un pic de 34 véhicules pour les feux tricolores pendant que les autres méthodes atteignent environ 25 véhicules,
- Le profil des courbes de toutes les méthodes est semblable à partir de la deuxième phase de génération des véhicules. En effet, on peut observer que les méthodes SVAC-PED et SVAC-SG creusent l'écart avec les feux tricolores pour $t \in [50; 100]$, c'est-à-dire une fois qu'environ cinq véhicules sont présents, et avant le pic de génération des véhicules,
- Pendant les deux premières phases de génération des véhicules (de 0s à 150s), les méthodes SVAC-SG et SVAC-PED semblent équivalentes, puis la méthode exacte (SVAC-SG) prend l'avantage en évacuant une dizaine de véhicules d'avance par rapport à la méthode temps-réel (SVAC-PED),
- A la fin de la simulation, les feux tricolores affichent un temps perdu moyen d'environ 55s pendant que les méthodes SVAC-PED et SVAC-SG offrent respectivement des temps de 30s et 22s, ce qui confirme les observations précédentes.

2.5.5.3 Discussion

Au cours des nombreuses simulations, aucune collision n'a été détectée (enregistrement des chocs au niveau physique du simulateur), et tous les véhicules ont bien respecté les consignes du serveur d'intersection. Pour ces premiers tests, il semble donc que la politique SVAC soit sécurisée. Cependant, la prochaine série de tests implique un nombre de véhicules plus important, ceux-ci devront donc confirmer la fiabilité.

D'après les observations, on peut conclure sur l'équivalence de la méthode feux tricolores à deux phases et de la méthode à quatre phases, nous pouvons donc effectuer la suite des tests avec l'une ou l'autre.

Les méthodes SVAC-PED et SVAC-SG offrent un gain significatif par rapport aux feux tricolores. De plus la méthode temps-réel (SVAC-PED) peut être validée puisqu'elle s'approche de la méthode exacte. Il est clair que les deux méthodes SVAC-PED et SVAC-SG sont équivalentes pendant les deux premières phases de génération des véhicules. Ainsi, c'est lors de la dernière phase de génération, qui présente des débits faibles, que la solution optimale semble tirer avantage de la connaissance au préalable des arrivées de tous les véhicules. En effet certaines actions qui semblent optimales à un moment donné, peuvent être repoussées dans le temps de manière à devenir plus intéressantes, c'est-à-dire notamment en formant des phases qui contiennent plus de mouvements.

2.5.6 Comparaison approfondie de la méthode temps-réel PED

L'objectif de ces tests est de s'intéresser en profondeur au comportement de la méthode temps-réel SVAC-PED dans une variété de conditions tout en assurant qu'aucune collision n'est possible. Nous choisissons d'effectuer la comparaison de la méthode SVAC-PED par rapport à la régulation par feux tricolores pour confirmer l'avantage de la régulation coopérative par rapport aux méthodes actuelles de régulation du trafic.

2.5.6.1 Paramètres

Les tests sont effectués sur les deux types d'intersections décrites précédemment (Figure 2.17). Le paramètre N correspondant au nombre de véhicules générés lors d'une même simulation est fixé à 1 000.

On utilise trois niveaux de trafic, faible, moyen, et fort correspondants respectivement à un taux de génération total f de 0.2 v/s, 0.4 v/s et 0.8 v/s (voir Tableau 2.4).

Débit en véhicules par seconde	Débit en véhicules par heure
0.2	720
0.4	1440
0.8	2880

Tableau 2.4 – Correspondance entre débit par seconde et débit par heure

De plus, pour chaque situation, nous générons des séquences homogènes et des séquences non homogènes. Dans une situation homogène, le taux de génération des véhicules est le même dans toutes les voies. Dans le cas non homogène, un débit faible est attribué à un axe de circulation, tandis qu'un débit élevé est attribué à l'autre axe de circulation. Le débit faible correspond à 25% du débit total de l'intersection et le débit élevé correspond à 75%.

2.5.6.2 Résultats

Pour comparer les feux tricolores avec la méthode de régulation SVAC-PED, nous choisissons d'observer le Temps de Stop moyen (TS) et le Temps de Trajet moyen (TT). Nous nous intéressons également au Temps d'Evacuation Supplémentaire (TES), c'est-à-dire le temps nécessaire pour évacuer les véhicules restants à partir du moment où la génération des véhicules est terminée. Toutes ces mesures sont données en secondes.

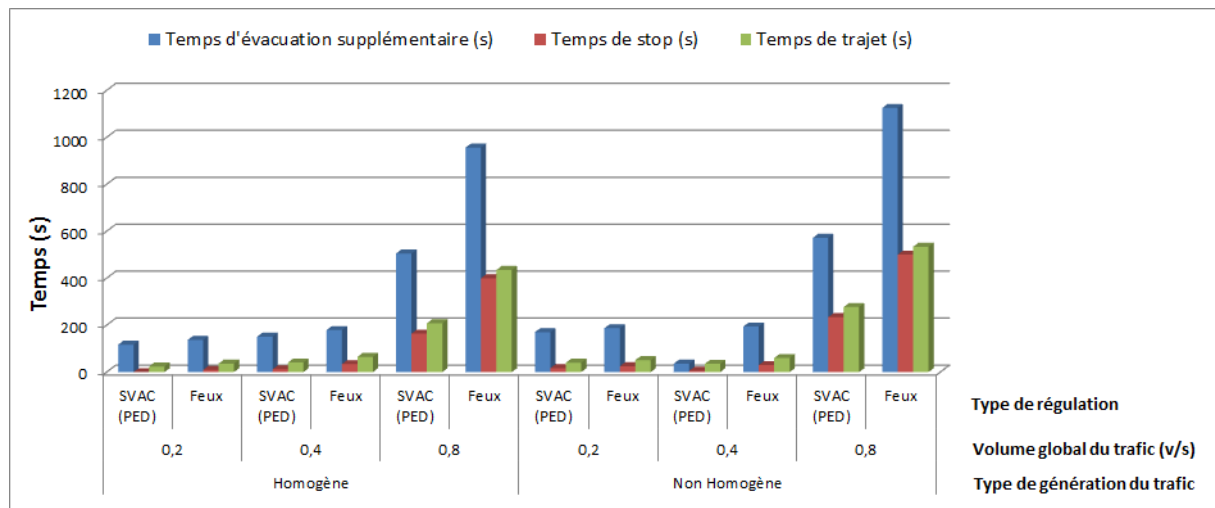


Figure 2.20 - Comparaison FT / SVAC-PED pour une intersection à 4 branches comportant 3 mouvements

En analysant le graphique (voir Figure 2.20), on peut tirer plusieurs observations majeures :

- Pour n'importe quel débit du trafic et pour n'importe quel type de génération, la politique SVAC-PED donne toujours de meilleurs résultats que la politique des feux tricolores, aussi bien pour le TES que pour le TS et le TT,

- On remarque également que pour un faible débit du trafic, les deux politiques sont relativement proches, en effet le TS étant presque nul les véhicules sont évacués au fur et à mesure des arrivées, sans création de files d'attente importantes,
- Pour un fort débit du trafic en revanche, le TS nous informe que des files d'attente sont formées dans les voies d'entrée, on remarque alors que SVAC-PED est largement supérieur aux feux tricolores puisque le TT est approximativement deux fois inférieur pour SVAC-PED,
- En comparant les résultats de la génération homogène et ceux de la génération non homogène, nous constatons que dans le deuxième cas les temps sont légèrement supérieurs, en particulier pour un fort débit du trafic.

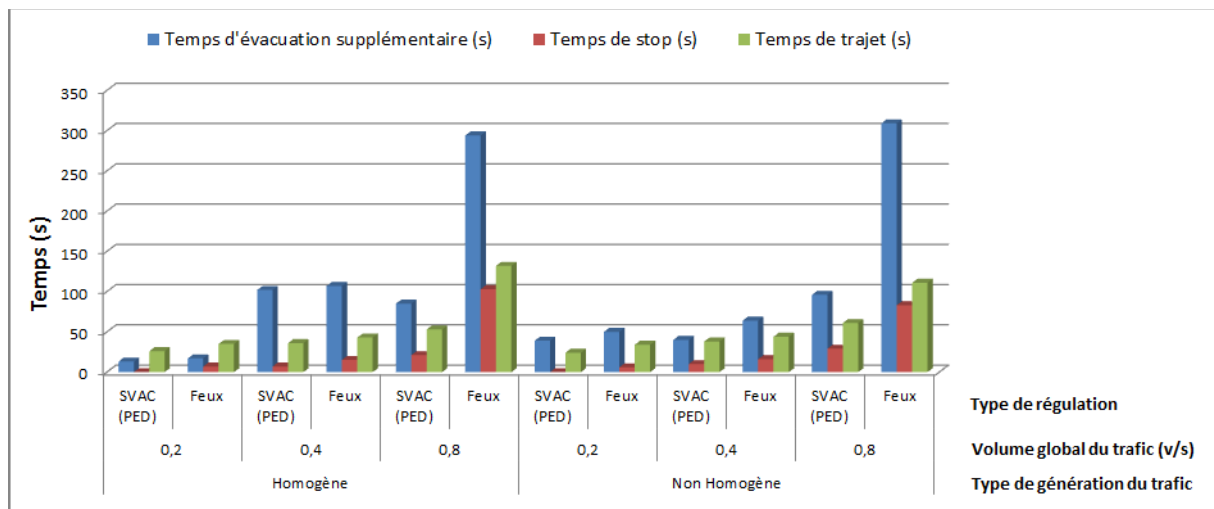


Figure 2.21 - Comparaison FT / SVAC-PED pour une intersection à 12 branches comportant 1 mouvement

En analysant le graphique (voir Figure 2.21), on peut tirer plusieurs observations majeures :

- Pour ce type d'intersection, dans tous les cas la méthode SVAC-PED donne de meilleurs résultats que la politique des feux tricolores, en particulier pour un fort débit du trafic. En effet, le graphique montre que le TES est 3 fois supérieur pour les feux que pour la politique SVAC-PED avec un débit du trafic de 0.8 v/s,
- Cependant, pour des débits de trafic faibles et moyens, la différence n'est pas significative puisque les files d'attente sont minimales quelle que soit la politique choisie,
- Contrairement à l'intersection précédente, la différence entre le cas homogène et le cas non homogène semble anecdotique. Ce résultat s'explique par le fait que des files d'attente plus longues se forment dans l'axe ayant le débit le plus élevé.

Pour confirmer les observations, il est intéressant de calculer les gains de la méthode SVAC-PED par rapport à la politique des feux tricolores en fonction des temps TS, TT et TES (voir Figure 2.22).

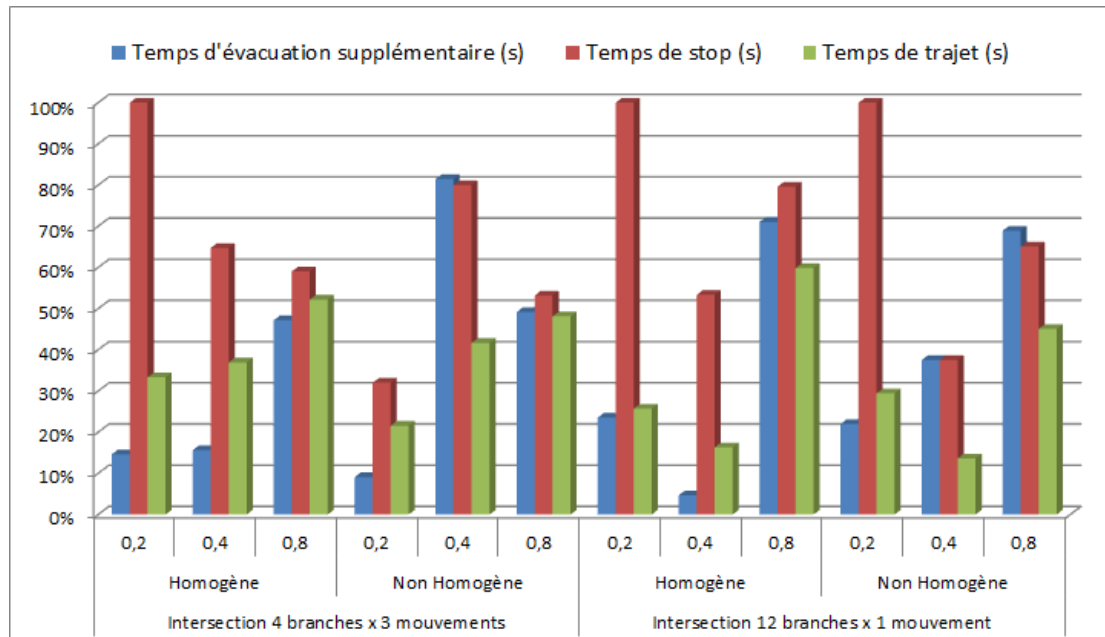


Figure 2.22 - Gains de SVAC-PED sur la régulation par FT

Il est important de signaler que les gains sont à interpréter avec prudence. En effet, plus le trafic a un débit faible, plus les temps enregistrés sont bas, ce qui favorise les variations aléatoires de gain entre les simulations. Les gains affichés confirment les observations précédentes. Nous pouvons retenir en particulier les gains supérieurs à 40% dans le cas d'un trafic congestionné, quelle que soit l'intersection.

Conclusion

Nous avons proposé un protocole (SVAC), capable de réguler le trafic d'une intersection isolée. Des tests réels ont montré que le protocole permet un certain niveau de sécurité face aux problèmes de communication ainsi que face à certaines erreurs relatives au positionnement. Cependant, une erreur de positionnement trop importante (erreur de détection de la voie par exemple) peut conduire à des collisions. En effet la fiabilité des systèmes de positionnement est un prérequis pour la régulation coopérative du trafic. Nous soulignons le fait qu'il est toujours possible d'ajouter des systèmes permettant d'améliorer le positionnement, par exemple des caméras, des lidars, etc. Le protocole proposé permet également de s'intéresser au problème d'ordonnancement des véhicules, grâce à l'utilisation du principe de la séquence de passage qui est générée par le serveur d'intersection. En particulier les tests réels ont confirmé l'hypothèse de départ $d < s$ qui suggère qu'il est intéressant de former des convois de véhicules.

Une méthode exacte d'ordonnancement basé sur la programmation dynamique a été proposée pour servir de référence. Son objectif est de minimiser le temps d'évacuation total d'une intersection grâce à la connaissance des dates d'arrivée et d'une estimation des paramètres d et s . Ensuite, nous proposons une modélisation par réseau de Petri pour répondre à la question du développement d'une solution temps-réel. Cette modélisation permet de traiter le partage des ressources d'une intersection à quatre voies avec des mouvements tout-droit. Elle permet de faire traverser des véhicules provenant de voies parallèles, tout en interdisant des véhicules

en conflit de traverser en même temps. De plus le RP est temporisé de manière à représenter l'écoulement des temps d et s . Une stratégie de régulation (DCP) est définie pour tirer avantage de la modélisation pour des fins d'optimisation de la séquence.

De plus la stratégie de régulation proposée permet une gestion plus précise et plus flexible qu'une régulation par feux, qu'elle soit à cycle fixe ou même adaptative. En effet la régulation des véhicules au niveau microscopique, notamment grâce à la connaissance des destinations des véhicules, offre plusieurs avantages majeurs :

- La mesure de la distance inter-véhiculaire s'effectue tout au long du trajet,
- La distribution des droits-de-passage est indépendante des phases.

Finalement des simulations ont permis de confirmer l'avantage de la stratégie de régulation basée sur la formation de convois, notamment par rapport à une régulation classique par feux tricolores. Nous confirmons également que la méthode temps-réel propose une solution relativement proche de la solution exacte calculée grâce à la programmation dynamique.

Nous avons donc proposé un protocole (SVAC) ainsi qu'une stratégie de régulation (DCP) pour la régulation coopérative d'une intersection isolée. Dans le chapitre suivant nous étendons la solution à un Réseau d'Intersections (RI). En effet, la régulation d'un RI demande de traiter de nouvelles questions :

- Comment éviter l'interblocage du réseau qui peut être dû à des débordements de files ?
- Est-il possible de synchroniser les intersections de manière à obtenir des ondes vertes (c'est-à-dire la possibilité qu'un véhicule traverse plusieurs intersections de suite sans avoir le rouge) ?
- Peut-on garder un débit d'évacuation par intersection proche de celui d'une intersection isolée ?

CHAPITRE N°3. RÉGULATION COOPERATIVE D'UN RESEAU D'INTERSECTIONS

Introduction

La commercialisation future des véhicules autonomes requiert des approches pour prévenir l'interblocage dans un réseau d'intersections (RI). L'interblocage est une situation critique dans laquelle aucun changement n'est possible parce que deux actions, ou plus, attendent chacune que l'autre, ou les autres, se terminent. L'interblocage dans le cas du trafic peut se traduire par des congestions persistantes, qui ne peuvent être résolues sans intervention humaine. Les conducteurs peuvent effectuer de nombreuses actions comme serrer le véhicule qui précède, reculer, ou encore modifier l'itinéraire initial en changeant de destination. Retrouver une situation normale peut prendre dans certains cas plusieurs heures, voire plusieurs jours [125]. Au lieu de compter sur les utilisateurs des véhicules autonomes, il est préférable d'améliorer la gestion de la situation dans laquelle l'interblocage risque d'apparaître. C'est-à-dire garantir que l'interblocage est impossible en partant du principe qu'aucune intervention humaine n'est autorisée [126].

Jusqu'à il y a quelques années, il n'y avait pas de vision claire sur le développement des techniques de Management Coopératif d'Intersection (MCI). Ainsi, la gestion de l'interblocage dans un RI était traitée à travers une approche probabiliste ou par des modèles macroscopiques [127]. Toutefois, l'interblocage résulte d'un partage de ressources à l'échelle microscopique. Une publication notable [128] s'est intéressée à l'interblocage routier à travers la capacité des véhicules à communiquer avec leur environnement. Cependant, les auteurs ont soutenu qu'un cycle occupé n'implique pas un interblocage. Plus précisément, ils supposent que chaque véhicule présent dans le circuit se déplace de manière synchronisée, ainsi aucune collision n'est observée et chaque véhicule peut avancer. Cette approche nécessite que les véhicules soient capables de serrer le véhicule qui précède, malheureusement les véhicules autonomes doivent respecter un espace inter-véhiculaire minimum.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que nous souhaitons proposer une approche qui permet d'éviter des temps de calcul importants nécessaires dans la détection et la récupération de l'interblocage. En effet, l'interblocage est un problème complexe qui requiert un compromis entre le temps de calcul et la fluidité du trafic. Ainsi, on s'intéresse principalement à trois questions :

1. Temps de calcul :

Le temps nécessaire à la résolution du problème ne doit pas retarder la régulation des intersections. En effet, les véhicules qui ne possèdent pas le droit de passage ne peuvent pas traverser l'intersection pendant le temps de calcul.

2. Fluidité du trafic :

Le temps d'évacuation de chaque véhicule ne doit pas être sensiblement réduit par des règles de sécurité fortes.

3. Décentralisation :

Dans l'absolu, il serait préférable que les règles locales à chaque intersection soient suffisantes pour converger vers un réseau qui ne peut pas être sujet à l'interblocage.

Les deux premières questions sont considérées comme les exigences majeures pour fournir une heuristique acceptable de prévention de l'interblocage. Ainsi, nous proposons un modèle mathématique permettant de réguler l'occupation du réseau grâce au concept de réservation. En outre, un premier pas est effectué vers la décentralisation, à travers un protocole dans lequel chaque intersection est capable de prendre une part de décision, en fonction des mouvements des véhicules. Nous allons donc étudier un protocole basé sur le MCI, couplé à une heuristique capable de prévenir l'interblocage dans un environnement urbain.

Pour commencer nous présentons quelques publications notables traitant de l'interblocage, sans considérer le contexte du trafic. Il est ensuite important de bien expliquer le cas de l'interblocage dans un RI. Nous proposons en conséquence une stratégie de contrôle anti-interblocage, c'est-à-dire un protocole et une heuristique qui permettent de prévenir l'interblocage tout en gardant la fluidité du trafic. Une première série de simulations doit permettre d'évaluer la capacité de la méthode à évacuer tous les véhicules sans interblocage, tout en assurant un trafic fluide. Dans la partie suivante, nous nous intéressons au problème du routage des véhicules. Le but est de tester la possibilité d'améliorer la fluidité du trafic à travers des méthodes de détermination du meilleur trajet. Une nouvelle série de simulations va permettre d'y répondre.

3.1 Littérature et interblocage

Dans [129], l'auteur a défini les quatre conditions nécessaires à l'apparition d'un interblocage :

1. **Exclusion mutuelle** : une ressource ne peut pas être allouée à plusieurs tâches simultanément,
2. **Détention et attente** : une tâche qui détient une ressource peut demander d'autres ressources,
3. **Pas de préemption** : seule une tâche peut relâcher les ressources qu'elle détient,
4. **Attente circulaire** : au moins deux tâches forment un cycle dans lequel chaque tâche attend que la tâche suivante relâche sa ressource.

L'auteur a montré qu'il est suffisant d'enlever une des quatre conditions pour prévenir l'apparition de l'interblocage.

L'interblocage est une question importante dans de nombreux systèmes qui impliquent un partage des ressources complexe entre les tâches. Il a été largement étudié dans différents domaines, comme pour les systèmes de Véhicules à Guidage Automatique (VGA), dans les Systèmes de Fabrication Flexibles (SFF), ou encore dans les systèmes de parallélisme en informatique. Il existe quatre méthodes pour traiter le problème de l'interblocage; la **prévention**, l'**évitement**, la **détection/correction** et l'**ignorance**. Ni la détection/correction, ni l'ignorance ne peuvent contribuer à l'amélioration de la situation dans le cadre du trafic.

L'approche par évitement consiste à vérifier à chaque état du système, si l'allocation des ressources mène à des états sans interblocage. La méthode de prévention élimine à priori la possibilité qu'un interblocage puisse apparaître, grâce à un ensemble de règles additionnelles. Par exemple, on peut imaginer une règle qui limite le nombre de véhicules qui traversent, en fonction de l'occupation de la destination et de sa capacité.

L'évitement d'interblocage a été largement traité dans le cas de certains VGA qui se déplacent sur des routes prédéfinies dans les SFF. L'Algorithme du Banquier (AB) [130,131] dans lequel une ressource est attribuée seulement si l'état suivant permet à tous les processus de terminer leur exécution (état sain), est la base de nombreuses approches. L'AB a été amélioré et étendu dans le but de coller aux conditions du transport dans les SFF. Dans le cas général, la recherche pour savoir si un état est sain est un problème NP [132]. Ainsi la vérification des états dans l'AB risque d'éliminer des états sains, qui n'auraient pas mené à un interblocage. Cette approche est acceptable pour les SFF dans lesquels le nombre de véhicules est limité. Malheureusement, certaines éliminations des états peuvent compromettre significativement l'efficacité d'une régulation soumise à des congestions, en particulier en milieu urbain.

D'autres travaux notables sont basés sur les Réseaux de Petri (RP) avec, soit une méthode de prévention de l'interblocage, soit une méthode d'évitement. Dans [133], le RP est utilisé pour éliminer le conflit de "l'attente circulaire" et effectue le routage des VGA. Cependant, il n'y a aucune garantie que le VGA puisse atteindre sa destination. Ainsi, il est complexe de transposer une telle approche pour la régulation du trafic urbain. Dans [134,135,136], le contrôle des siphons dans le RP est utilisé pour la prévention de l'interblocage. Le principal avantage de ce type de méthode est le fait que le système est dépourvu d'interblocage, sans avoir à éliminer des états sains du système. Cependant, le siphon minimal est un problème NP. Ainsi, il est impossible de considérer une telle approche pour une application temps-réel qui requiert un nouveau modèle RP pour chaque nouvelle arrivée d'un véhicule.

3.2 Interblocage routier

Les quatre conditions de Coffman requièrent un certain niveau d'abstraction pour coller au cadre du trafic routier. En effet, le mouvement d'un véhicule est un problème continu, tandis que les tâches et les ressources font partie d'un problème discret. Si nous considérons qu'une tâche est représentée par l'occupation d'un segment de route, de sorte que la dimension du segment corresponde au moins à l'espace occupé par un véhicule, alors les trois premières conditions sont inhérentes au système. En effet, pour les deux premières conditions, deux véhicules ne peuvent pas être superposés et chaque véhicule nécessite un espace additionnel pour libérer l'espace actuellement occupé. Pour la troisième, sans la capacité de faire disparaître un véhicule ou de le faire reculer, il est impossible d'obtenir une "sorte de préemption". Ainsi, une fois qu'une "attente circulaire" apparaît, l'interblocage est fatalement présent.

La Figure 3.1 présente deux situations classiques d'interblocage dans le domaine du transport urbain. Dans la situation A, les véhicules 1, 2, 3 et 4 bloquent les zones de conflit, empêchant ainsi tout mouvement en formant une "attente circulaire". En ajoutant une règle

qui interdit l'accès à la zone de conflit en fonction de l'occupation de la destination, le problème est résolu. Cependant, dans la situation B, cette règle n'est pas suffisante. Il est donc nécessaire d'ajouter une nouvelle règle qui limite cette fois l'accès aux zones de stockage.

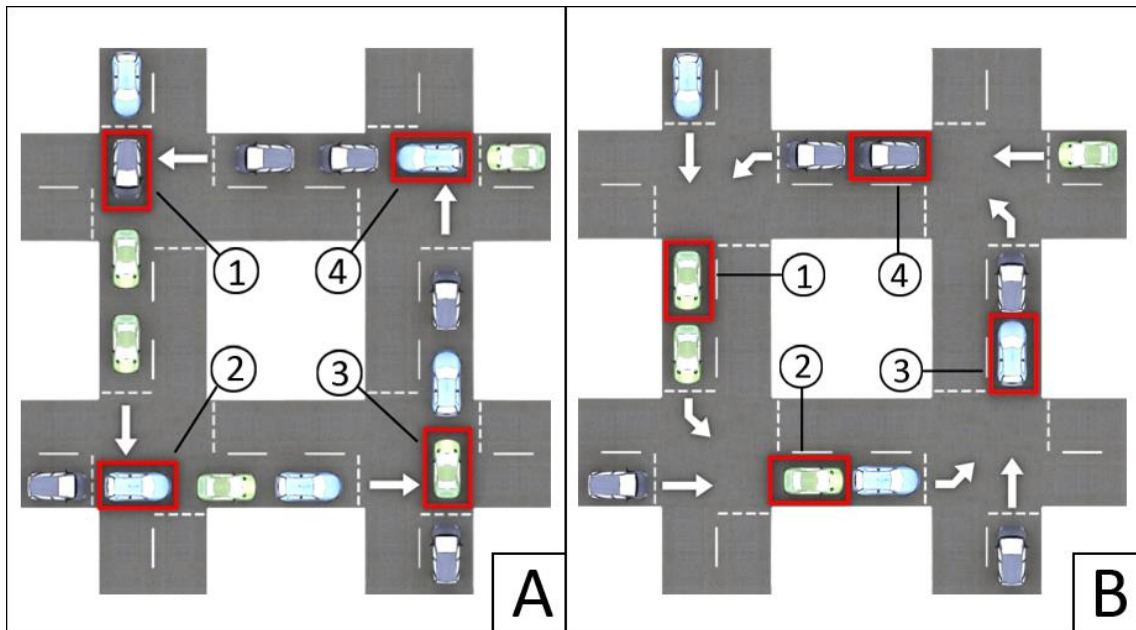


Figure 3.1 – Exemples de situations simples d'interblocage dans un RI

Toutefois la Figure 3.2 nous apprend que les deux règles précédentes ne sont pas suffisantes dans une situation plus complexe. La libération empirique des places n'est donc pas une solution acceptable.

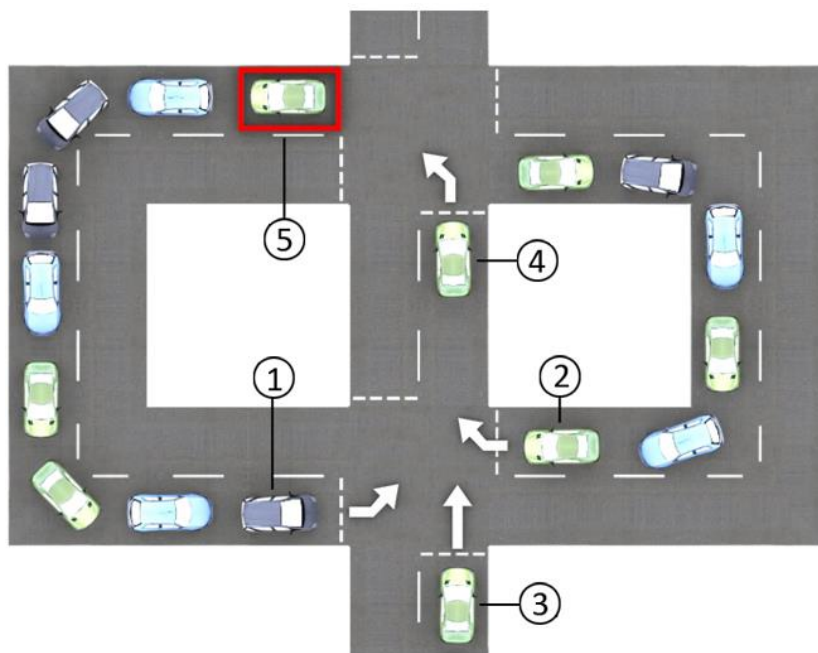


Figure 3.2 - Exemple de situation complexe d'interblocage dans un RI

3.2.1 Système étudié et formulation du problème

Le système étudié est un RI traversé par des véhicules autonomes. Les intersections d'un RI sont connectées entre elles par des routes. Les intersections, ainsi que les routes qui connectent deux intersections, sont limitées par une capacité. Nous considérons qu'une route peut avoir une voie par direction ou bien une voie bidirectionnelle. Pour la suite, les zones de stockage désignent les voies qui connectent des intersections entre-elles, c'est-à-dire qu'elles possèdent une limite de capacité. Nous ajoutons la notion d'entrées et de sorties pour le RI. Ces zones n'ont aucune limite de capacité. Chaque véhicule possède une origine connue (zone d'entrée du réseau) et une destination connue (zone de sortie du réseau). L'itinéraire de chaque véhicule peut être déterminé préalablement ou bien être calculé en fonction de la situation du trafic dans le réseau. L'objectif de notre méthode est la prévention à priori de l'interblocage, nous considérons donc qu'une fois défini, le trajet d'un véhicule ne doit pas changer. En effet, détourner un véhicule pourrait revenir à une solution de récupération.

Les voies et les intersections (voir Figure 3.3 (A)), sont divisées en espaces élémentaires $s_i \in S$ qui ne peuvent pas être occupés physiquement par plus d'un véhicule [137] (voir Figure 3.3 (B)). Nous considérons une représentation à trois dimensions de l'occupation de la ressource, à travers un espace, une étape (pas de temps) et une direction de mouvement. Ainsi, nous avons pour un espace s_i , plusieurs cellules $c_{i,j,k}$, où j et k représentent respectivement l'étape et la direction du mouvement. Chaque cellule $c_{i,j,k}$ est un nœud qui compose un graphe fini $G = (C \cup \{E_{in}, E_{out}\}, L)$, où C est l'ensemble des cellules (voir Figure 3.3 (C)). E_{in} et E_{out} sont les nœuds d'entrée et de sortie respectivement et L est l'ensemble des arcs orientés. Il existe un arc de $c_{i,j,k}$ vers $c_{i,j+1,k}$ si $j + 1 \leq J$, avec J le maximum d'étapes traitées. La Figure 3.3 (C) nous donne par exemple $J = 5$. En respectant la direction du mouvement, un espace s_i qui donne accès direct à un espace voisin $s_{i'}$ est lié par un arc de $c_{i,j,k}$ vers $c_{i',j+1,k}$ sous la contrainte $j + 1 \leq J$. Il existe également un arc de E_{in} vers toute cellule accessible directement depuis la zone d'entrée, ainsi qu'un arc depuis toute cellule qui permet à un véhicule de quitter le réseau, vers E_{out} .

Soit $V = \{1, 2, \dots, n\}$ l'ensemble des véhicules. Chaque véhicule $v \in V$ est associé au trajet $p_v = (E_{in}, s_{i_1}, s_{i_2}, \dots, s_{i_m}, E_{out})$ qui représente un ordre de passage ordonné à travers m espaces du réseau. Le problème est de déterminer un trajet qui permet au véhicule v de sortir du réseau sans interblocage, c'est-à-dire de trouver un chemin dans le graphe G défini par $p_v^c = (E_{in}, c_{i_1, j_1, k_1}, c_{i_2, j_2, k_2}, \dots, c_{i_m, j_m, k_m}, E_{out})$, en respectant l'enchaînement des espaces et les directions des mouvements. Nous pouvons maintenant présenter la condition qui assure qu'un chemin permet à un véhicule de traverser tout le réseau sans interblocage.

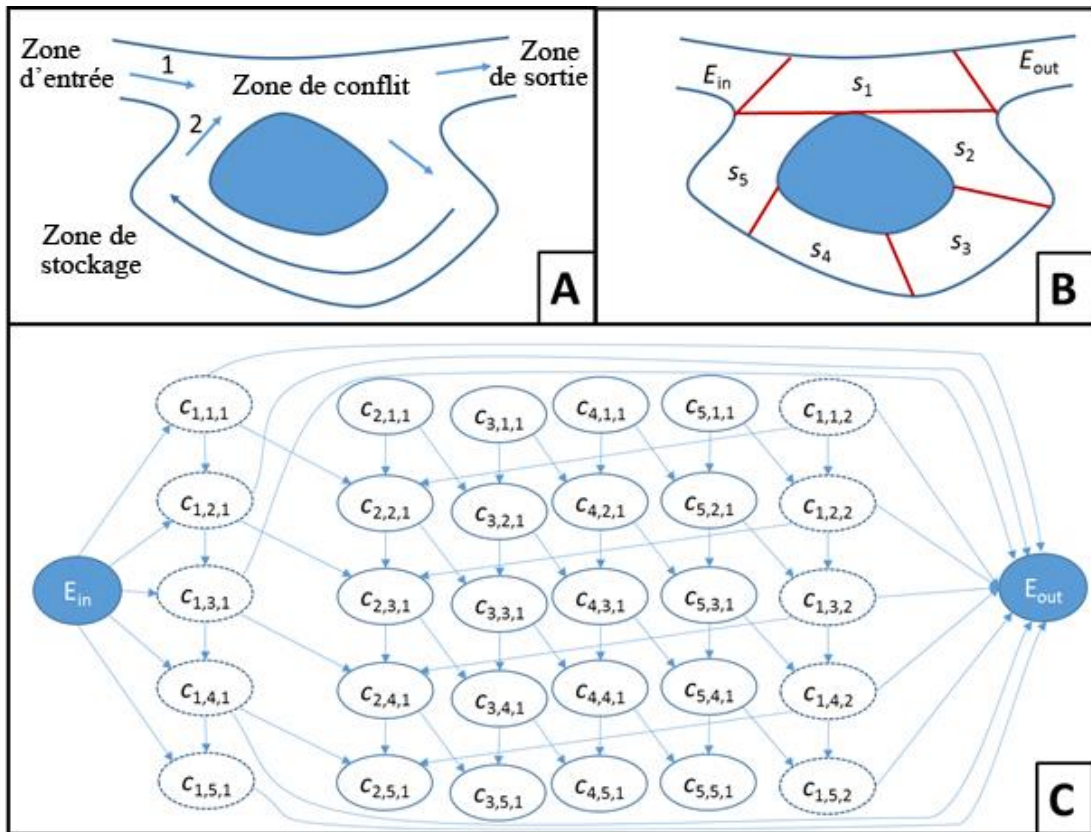


Figure 3.3 - Modélisation d'un réseau d'intersections élémentaire

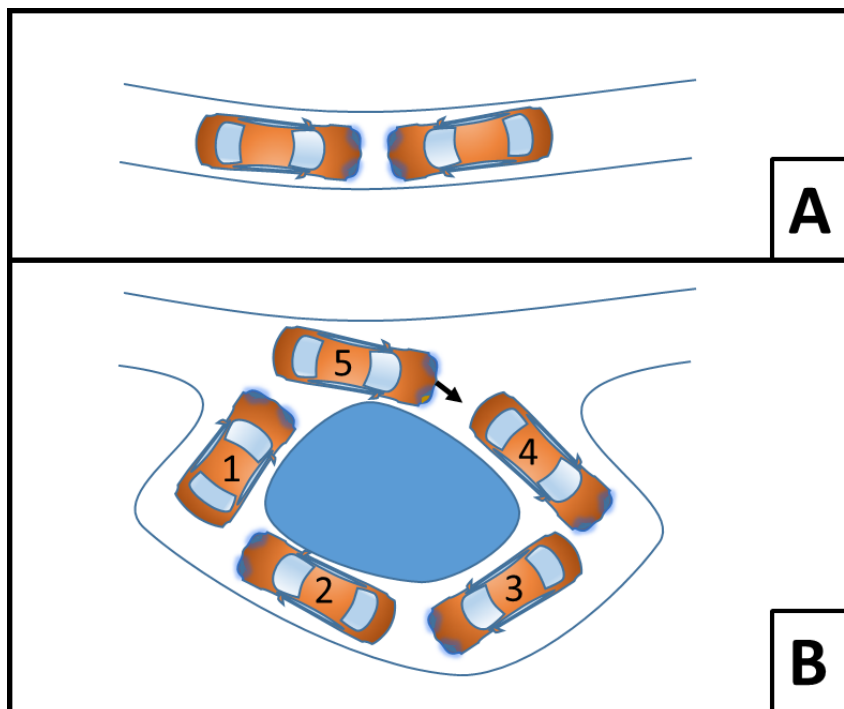


Figure 3.4 - Exemples d'interblocage par "attente circulaire"

3.2.2 Contraintes d'occupation et de réservation

On définit O l'application de l'ensemble des cellules C vers l'ensemble des véhicules qui occupent les cellules. Grâce à la définition des cellules, on a :

$$0 \leq |O(c_{i,j,k})| \leq 1 \quad (3.1)$$

Pour tout $c_{i,j,k} \in C$. Nous obtenons donc soit $O(c_{i,j,k}) = \{v\}$ avec $v \in V$, soit $O(c_{i,j,k}) = \emptyset$.

Sous cette condition, si on posait $O(c_{i,j,k}) = \bigcup_{k' \neq k} O(c_{i,j,k'})$, alors la contrainte d'occupation conventionnelle serait satisfaite en respectant (3.1). Si la contrainte d'occupation est satisfaite pendant tout le trajet de chaque véhicule, on valide la prévention d'un cas simple d'interblocage (voir Figure 3.1(A)). Cependant, ce n'est pas suffisant pour traiter les autres situations d'interblocage. Une discussion notable sur le problème de modélisation est présentée dans [138,139]. Pour cette raison, au lieu de considérer la contrainte d'occupation à travers O , on introduit l'application de la réservation qui est défini comme suit :

$$Res(c_{i,j,k}) = \left(\bigcup_{k' \neq k} O(c_{i,j,k'}) \right) \cup \left(\bigcup_{k' \neq k} O(c_{i,j-1,k'}) \right) \quad (3.2)$$

Les contraintes sur $Res(c_{i,j,k})$ et $O(c_{i,j,k})$ vont déterminer si un interblocage peut apparaître ou non. Ces contraintes doivent prévenir l'apparition de la quatrième condition de Coffman ("attente circulaire") dans un RI.

Une "attente circulaire" peut apparaître directement ou à travers la transitivité dans les requêtes des ressources. Dans le cas direct, l'"attente circulaire" se produit lorsque deux véhicules partagent la même voie et roulent dans des directions opposées (voir Figure 3.4 (A)). Formellement, avec $i \neq i'$ et $k \neq k'$ on obtient un interblocage si les trois conditions suivantes sont satisfaites :

$$O(c_{i,j,k}) = O(c_{i',j+1,k}) \neq \emptyset \quad (3.3)$$

$$O(c_{i',j,k'}) = O(c_{i,j+1,k'}) \neq \emptyset \quad (3.4)$$

$$O(c_{i',j,k'}) \neq O(c_{i,j,k}) \quad (3.5)$$

Nous allons maintenant nous intéresser à l'"attente circulaire transitive". Celle-ci est due à des cycles dans le RI (voir Figure 3.4 (B)). Un même cycle peut s'étendre sur plusieurs intersections, dans lesquelles les mouvements d'accès sont en conflit avec les autres mouvements des véhicules qui se trouvent dans ce cycle (voir Figure 3.1 (B)). L'interblocage se produit si tous les espaces d'accès du cycle sont occupés et si aucun véhicule du cycle ne souhaite sortir de ce dernier.

Théorème 1. Si tous les véhicules ont planifié un trajet qui relie une entrée du RI à une sortie du RI en respectant :

$$\forall c_{i,j,k} \in C, |Res(c_{i,j,k})| \times |O(c_{i,j,k})| = 0 \quad (3.6)$$

Alors il n'y a aucun interblocage.

Preuve. Nous devons prouver que l'égalité (3.6) permet de satisfaire les contraintes d'occupation, et de prévenir tous les types d'"attente circulaire", c'est-à-dire le cas direct et le cas transitif.

Premièrement, si l'égalité (3.6) est satisfaite, alors la contrainte d'occupation est également satisfaite. En effet, il est impossible d'avoir $O(c_{i,j,k}) = \{v\}$ et $O(c_{i,j,k'}) = \{v'\}$, parce que si

un tel cas existe, alors on a $Res(c_{i,j,k}) = \{v'\}$ et $Res(c_{i,j,k'}) = \{v\}$, ce qui contredit l'égalité (3.6).

En considérant qu'une "attente circulaire" est possible, alors grâce à la condition (3.1), on obtient $Res(c_{i,j+1,k'}) \neq \emptyset$. Cependant, la condition (3.4) donne $O(c_{i,j+1,k'}) \neq \emptyset$. Donc, $|Res(c_{i,j+1,k'})| \times |O(c_{i,j+1,k'})| \neq 0$. L'égalité (3.6) prévient l'apparition de l'interblocage dans le cas direct de l'"attente circulaire". Il reste à prouver le cas de l'"attente circulaire transitive".

L'égalité (3.6) empêche l'accès à tous les cycles d'un RI si celui-ci mène à la saturation d'un cycle. Nous supposons qu'il existe un cycle saturé, dans lequel un véhicule v est le dernier à entrer dans le cycle. Le véhicule v se trouve dans une cellule d'accès $c_{i,j,k}$, sinon il n'y a pas d'interblocage. Pour la même raison, dans le cycle, un véhicule v' se trouve derrière le véhicule v . v' occupe la cellule $c_{i',j,k'}$. Il y a deux scénarii. Dans le premier scénario, v' peut quitter le cycle depuis $s_{i'}$, ce qui permet de libérer une place dans le cycle, et ainsi éviter l'interblocage. Dans le deuxième scénario, v' va rejoindre s_i . Or, c'est impossible puisque $Res(c_{i,j+1,k}) = \{v\}$.

Le théorème 1 signifie que chaque cellule réservée ne peut pas être occupée. Cependant, les cellules peuvent être réservées par plusieurs véhicules. Le théorème 1 est puissant parce qu'il identifie les états sains et les états non sains en vérifiant si l'égalité (3.6) est satisfaite ou non.

3.2.3 Approche proposée

Au lieu de vérifier l'équation (3.6) à chaque progrès dans le système, un trajet sain p_v^c dans G est proposé pour chaque véhicule. Ainsi, pour chaque nouveau véhicule qui arrive dans une voie d'entrée du réseau, le problème de recherche d'un trajet pour ce véhicule revient à trouver p_v^c dans G :

- Pour l'occupation : en ignorant toutes les cellules déjà occupées et toutes les cellules déjà réservées dans G ,
- Pour la réservation : en ignorant toutes les cellules déjà occupées.

Le problème est polynomial parce qu'il a au maximum la complexité du problème du plus court chemin dans un graphe sans poids négatifs. La borne supérieure de la complexité du routage d'un véhicule est donné par $\mathcal{O}((|C| + 2) \times |L|)$ avec $|C|$ le nombre de cellules et $|L|$ le nombre d'arcs. Cependant, il requiert un serveur pour le réseau global. Le serveur doit fournir le calcul du trajet ainsi que la signalisation pour les véhicules. La section suivante montre comment le problème global est décomposé, de manière à spécifier le travail du serveur global.

3.3 Stratégie de contrôle anti-interblocage

La stratégie de contrôle est basée sur le Système du Véhicule Actionneur Coopératif (SVAC). Ainsi, les véhicules doivent négocier le droit de passage à travers le serveur d'intersection (voir Figure 3.5). Cependant, un serveur de réseau est requis pour prévenir le RI de l'interblocage. Nous appelons notre nouveau protocole de régulation : SVAC pour les

Réseaux d'Intersections (SVACRI). Dans la suite, nous proposons une architecture hiérarchique. Le réseau est divisé en un ensemble de sous-réseaux connectés entre eux. Chaque sous-réseau peut également être divisé jusqu'à ce qu'un sous-réseau soit un ensemble d'intersections connectées. La taille d'un sous-réseau est déterminée par les performances de calcul ainsi que les performances de communication. Chaque serveur considère uniquement les routes qui connectent les sous-réseaux ou les intersections, en fonction du niveau dans la hiérarchie. Dans la suite de la thèse, nous décrivons une architecture à seulement deux niveaux, c'est-à-dire le niveau du serveur de réseau et le niveau du serveur d'intersection.

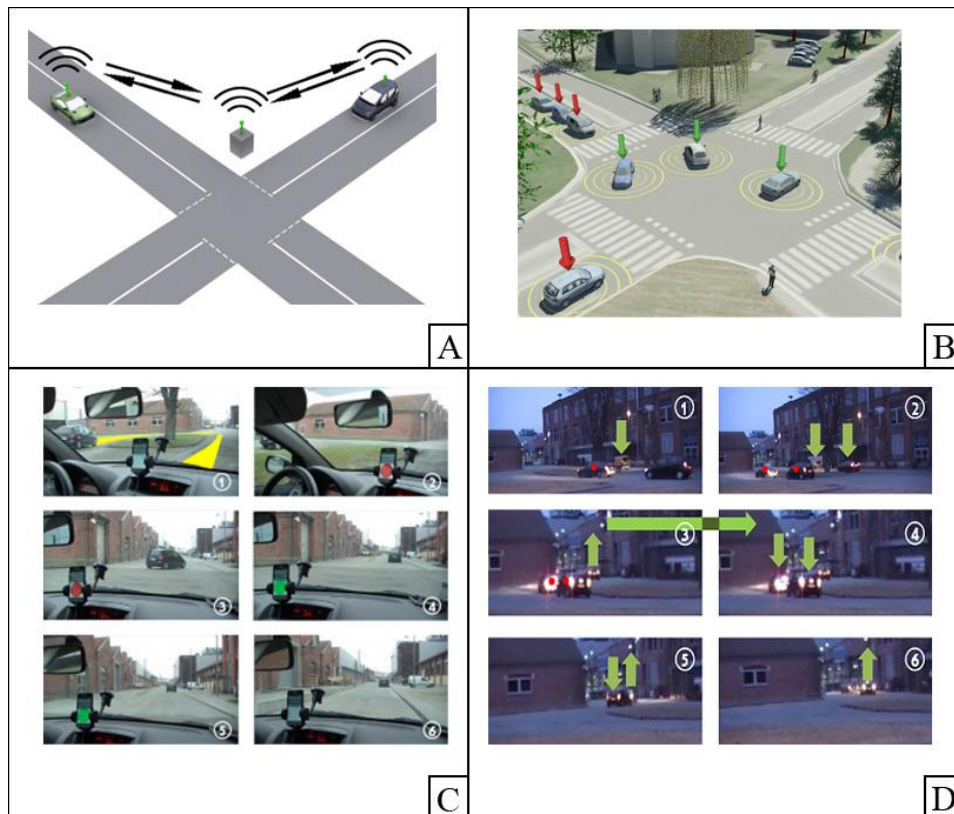


Figure 3.5 – Système de négociation du droit de passage individuel

3.3.1 Stratégie de décomposition

Les deux niveaux de régulation du trafic, c'est-à-dire le niveau réseau et le niveau intersection, doivent permettre une régulation globale du système. Il est nécessaire de détailler les règles de décomposition :

1. L'itinéraire du véhicule est considéré comme un problème qui vient en amont, c'est-à-dire qu'il est traité séparément. Ainsi, chaque véhicule possède un ensemble connu d'espaces ordonnés à traverser,
2. Le serveur de réseau ignore tous les espaces à l'intérieur des intersections (zones de conflit). Il considère uniquement les zones de stockage (voies) qui connectent deux intersections entre elles, dans le but de vérifier les contraintes d'occupation et de réservation. Les zones de conflit sont gérées directement par les serveurs d'intersection,

3. Dans chaque zone de stockage qui connecte deux intersections, un espace est virtuellement supprimé. Cet espace peut être physiquement occupé par un véhicule, mais il est ignoré par le serveur de réseau. Il correspond à une cellule réservée. Cela permet de considérer la contrainte de réservation en évitant la situation d'interblocage transitif,
4. Le serveur d'intersection ignore les voies d'entrée et les voies de sortie. Cependant, il communique avec toutes les intersections du réseau, et en particulier avec les intersections se trouvant aux extrémités du réseau (celles qui comportent les entrées et sorties du réseau),
5. Le serveur d'intersection respecte l'ordre des véhicules qui possèdent la même destination locale (prochaine zone de stockage).

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que la première règle limite le nombre d'arcs considérés ($|L|$) à deux arcs par cellule. En effet, un véhicule qui se trouve dans un état donné peut, soit rester dans le même espace, soit avancer dans le prochain espace de l'itinéraire. La seconde règle élimine les espaces conflictuels qui sont coûteux en termes de nombre de cellules. En effet, les zones de conflit sont traversées par de nombreux mouvements. Ainsi, le serveur d'intersection traite uniquement les zones de stockage. De plus, la troisième règle et la quatrième règle permettent de réduire encore le nombre de cellules considérées.

3.3.2 Architecture du protocole de prévention de l'interblocage

Pour des raisons de sécurité et d'efficacité, chaque intersection est équipée d'un serveur qui communique avec les véhicules, de manière à distribuer les droits de passage. Le serveur d'intersection sélectionne les véhicules qui ont le droit de passage et leur envoie le vert. Dans l'architecture proposée, nous considérons que le serveur de réseau communique avec tous les serveurs d'intersection, de manière à autoriser les véhicules à continuer leur trajet. Cependant, la régulation des zones de conflit reste le rôle des serveurs d'intersection.

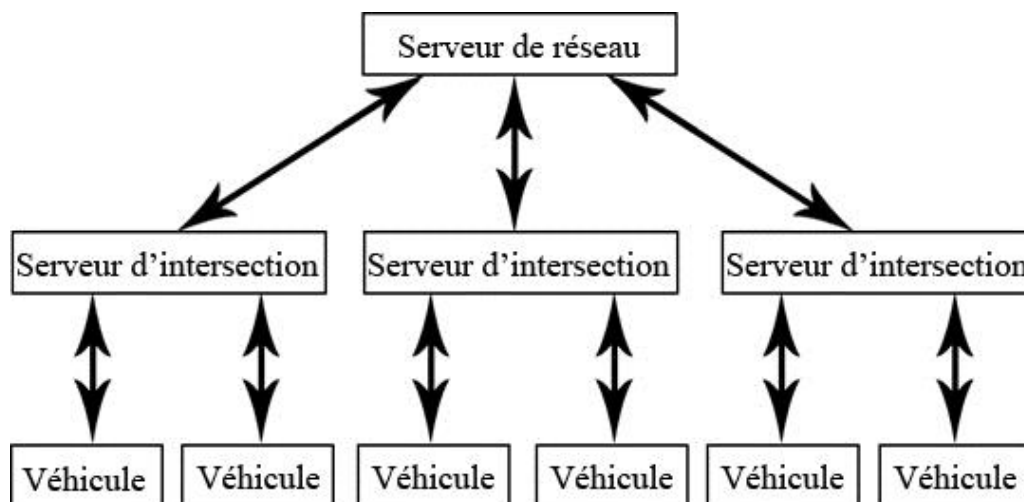


Figure 3.6 - Architecture du protocole SVACRI

L'architecture du protocole comporte plusieurs niveaux, un niveau pour le serveur de réseau, un niveau pour les serveurs d'intersection, et un niveau pour les véhicules (voir Figure 3.6). Les deux premiers niveaux sont responsables de la régulation de l'ensemble du système, il est

donc nécessaire de décrire le fonctionnement des éléments qui les composent ainsi que les interactions entre eux.

3.3.2.1 Serveur de réseau

Il collecte les informations du trajet de chaque véhicule et met à jour les données en fonction des mouvements actuels et futurs des véhicules. Le serveur construit des structures de données spécifiques, celles-ci permettent de stocker les trajets des véhicules en respectant les contraintes d'occupation et les contraintes de réservation. Le serveur de réseau contacte régulièrement chaque intersection, pour indiquer quels véhicules ne sont pas, ou plus, sous contraintes. Ces véhicules sont appelés "véhicules déverrouillés". Aucun droit de passage ne peut être donné par un serveur d'intersection sans le consentement préalable du serveur de réseau. C'est-à-dire que tout véhicule est par défaut dans un état "verrouillé".

3.3.2.2 Serveur d'intersection

Il est responsable de la collecte des informations des véhicules qui se présentent pour traverser l'intersection. Le serveur d'intersection envoie ces données directement au serveur de réseau pour qu'il puisse déterminer les "véhicules déverrouillés". Ensuite, grâce à la liste des "véhicules déverrouillés", l'intersection décide de ceux qui ont le droit de passage, en respectant les conflits entre les mouvements. Ainsi, chaque serveur d'intersection garde un certain niveau de liberté, de manière à améliorer le temps d'évacuation local.

3.3.2.3 Interactions

Le serveur de réseau communique avec les intersections, et les intersections communiquent avec les véhicules. Le protocole de communication a pour but de décrire les échanges de messages entre les différentes entités, au cours du trajet d'un véhicule à travers le réseau (voir Figure 3.7) :

- Une fois que le véhicule détecte une entrée du réseau, il envoie une requête d'entrée qui décrit le trajet désiré (itinéraire) au serveur d'intersection. La requête est ensuite transmise au serveur de réseau. Ce dernier ajoute le véhicule dans la base de données en respectant les contraintes d'occupation et les contraintes de réservation,
- Une fois que le véhicule est déverrouillé par le serveur de réseau, l'intersection actuellement occupée est informée de la décision. En tenant compte des critères locaux de sécurité et d'efficacité, le serveur d'intersection envoie un droit de passage au "véhicule déverrouillé", et transmet l'information en même temps au réseau de manière à mettre à jour la base de données,
- Une fois que le véhicule quitte l'intersection, il envoie une requête de sortie et attend une confirmation. Ensuite, le véhicule envoie une requête d'entrée à l'intersection suivante,
- Une fois que le véhicule rejoint une zone de sortie du réseau, il envoie une requête finale de sortie au serveur de réseau, à travers le serveur d'intersection. Le véhicule est alors complètement supprimé de la base de données du réseau.

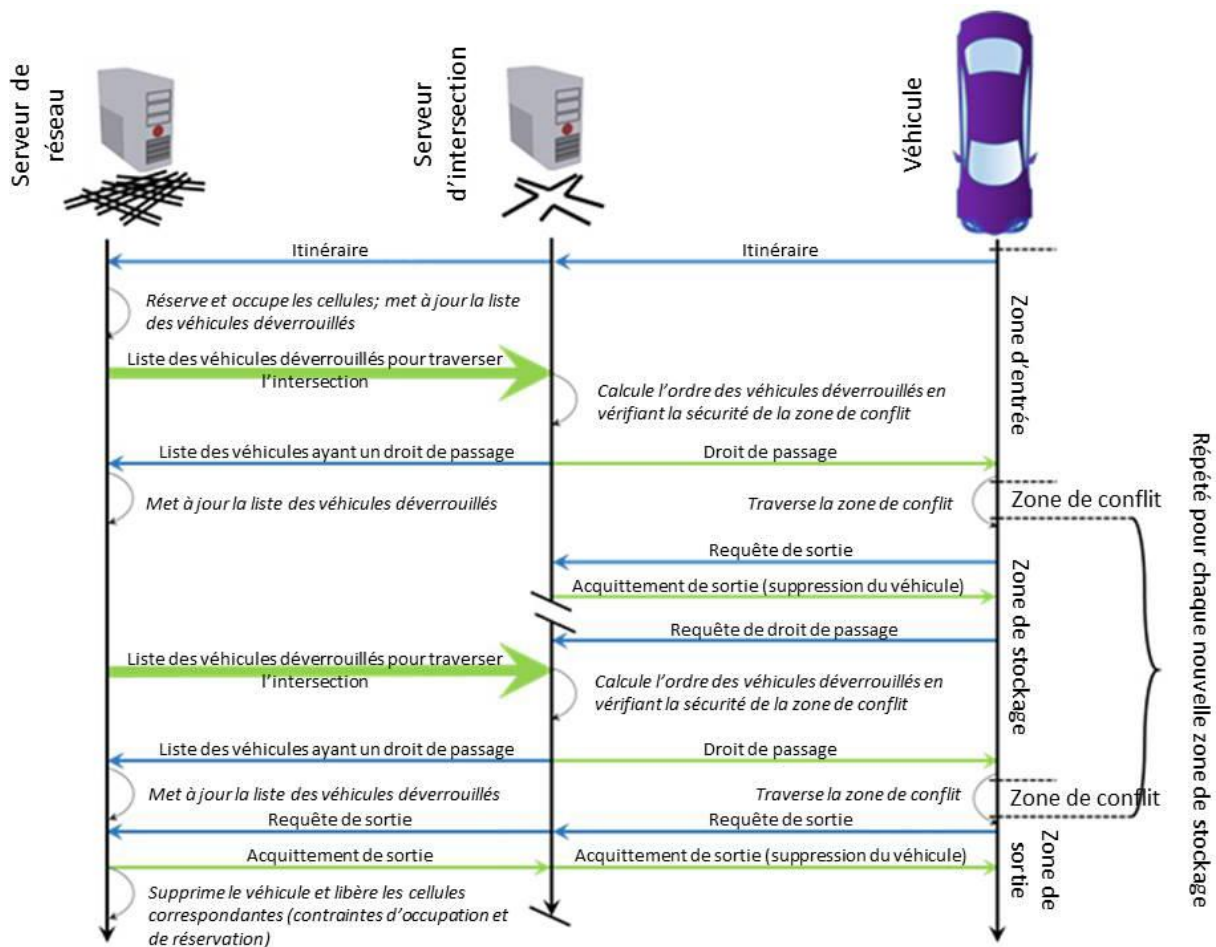


Figure 3.7 - Architecture de communication du protocole SVACRI

Dans la suite nous allons décrire plus en détails le processus d'ajout d'un véhicule dans la base de données du serveur de réseau, ainsi que le processus de déverrouillage des véhicules.

3.3.3 Contraintes de réservation et d'occupation à travers le protocole

A chaque arrivée d'un véhicule v , le serveur de réseau calcule le chemin p_v^c en respectant les contraintes d'occupation et les contraintes de réservation. Nous soulignons le fait que le traitement du trajet par le serveur de réseau dépend de sa disponibilité. Comme décrit précédemment, les cellules traitées sont limitées aux voies qui connectent les intersections (zones de stockage). De plus un espace est supprimé dans chacune de ces voies.

Prenons un exemple de RI simple comportant trois intersections et quatre véhicules ayant des trajets définis (voir Figure 3.8 (A)). Les véhicules arrivent successivement dans l'ordre 1, 2, 3 et 4 dans un temps assez court, les flèches décrivent les itinéraires désirés. Le serveur de réseau considère uniquement les voies A et B. Chaque voie possède une capacité d'accueil de trois véhicules, mais le serveur de réseau retient uniquement deux espaces par voie. De plus, les voies A et B sont bidirectionnelles, donc le serveur considère quatre cellules différentes pour chaque voie à chaque étape. Le respect des règles énoncées nous donne une représentation du problème sous forme de tableau, dans lequel on peut gérer les contraintes d'occupation et de réservation (voir Figure 3.8 (B)). Une cellule du tableau peut, soit être vide, soit contenir l'indice v d'un véhicule dans le cas d'une occupation ou d'une réservation,

soit contenir un ou plusieurs indices notés v' dans le cas d'une réservation d'un contre-sens. Nous constatons qu'aucune cellule n'est occupée par plus d'un véhicule à la fois, et que chaque cellule marquée est soit occupée, soit réservée.

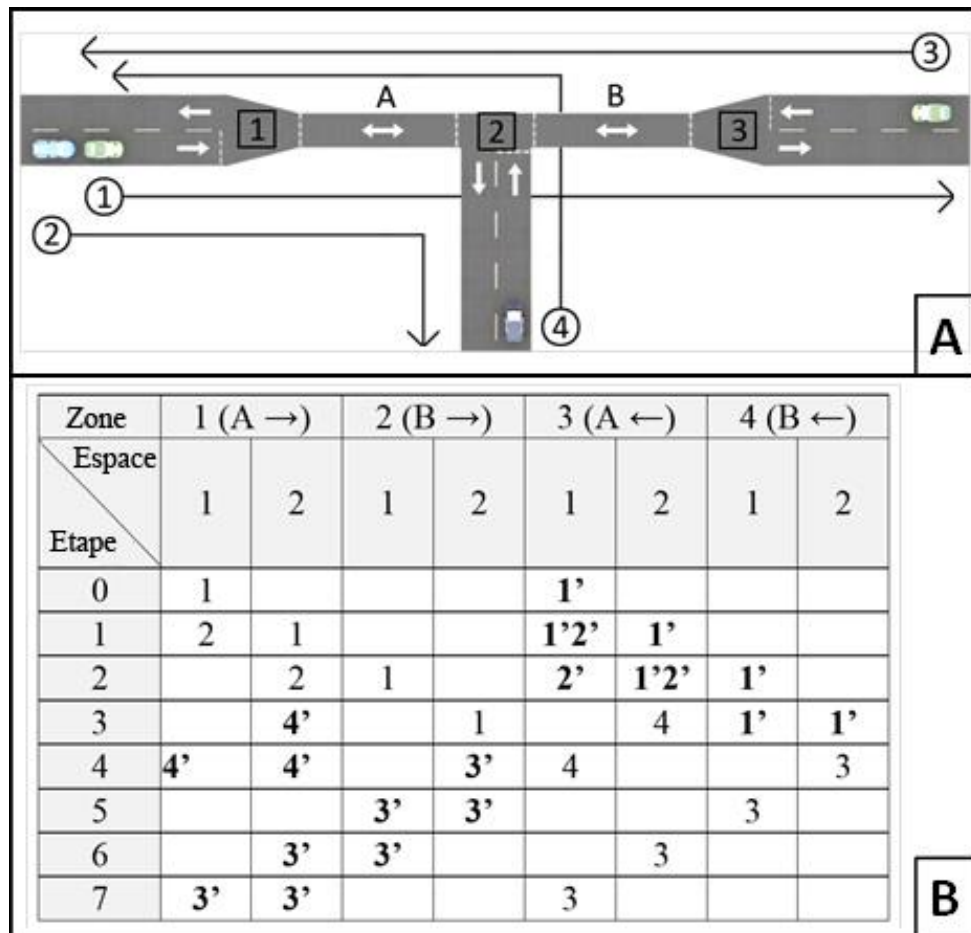


Figure 3.8 - Exemple de situation pouvant mener à l'interblocage dans un RI simple

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que la solution permet d'assurer la sortie de tous les véhicules (pas d'interblocage) grâce au serveur de réseau. En effet, la solution du serveur est de faire traverser d'abord les véhicules 1 et 2 aux intersections 1 et 2 (voir Figure 3.9). Ensuite, le véhicule 4 peut effectuer son trajet. Le véhicule 3 attend que le véhicule 1 quitte l'intersection 3, puis traverse le réseau.

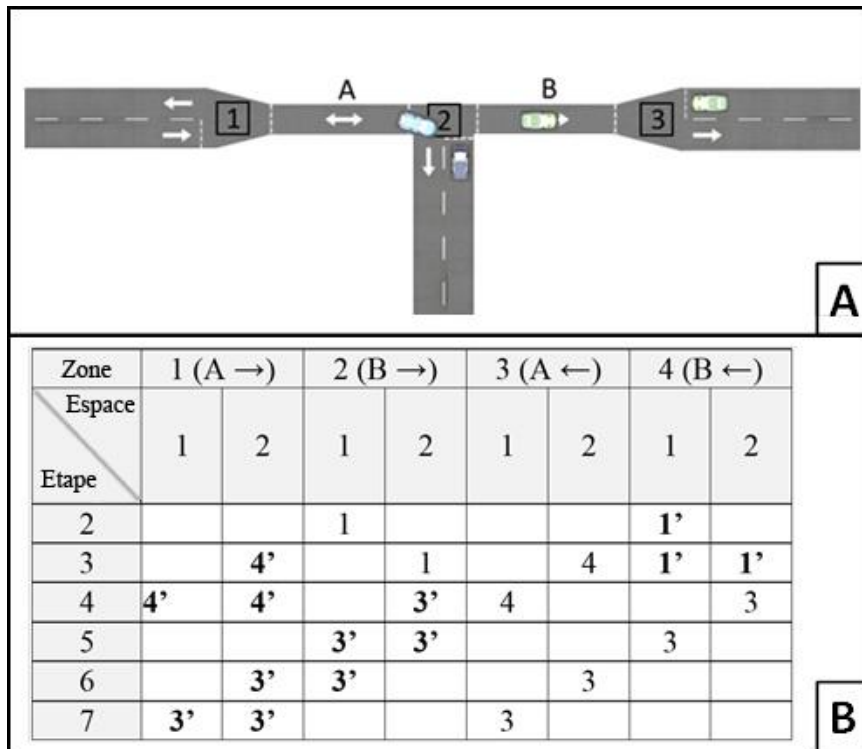


Figure 3.9 - Mise à jour de l'exemple de RI simple

Les trois étapes requises pour permettre à un véhicule de traverser le RI sont les suivantes :

1. Mise à jour :

Le serveur de réseau met à jour l'occupation et la réservation des cellules lorsque les véhicules obtiennent le droit de passage dans les voies de stockage. Par exemple, dans la Figure 3.8, le serveur met à jour les contraintes quand un véhicule donné obtient le droit de passage dans les zones A ou B. L'occupation et la réservation des cellules présentées dans Figure 3.8 (B), ne sont pas modifiées jusqu'à ce que le véhicule 1 obtienne un droit de passage depuis la zone A, c'est-à-dire pour traverser l'intersection

2. La mise à jour vide les cellules dans lesquelles se trouve l'indice du véhicule autorisé, mais uniquement dans la voie libérée par le véhicule. La Figure 3.9 donne la structure des données mise à jour après l'obtention du droit de passage par les véhicules 1 et 2, pour traverser l'intersection 2.

2. Véhicules déverrouillés :

Un véhicule verrouillé n'est pas considéré par le serveur d'intersection, ainsi il ne peut pas obtenir le droit de passage. Lorsqu'un véhicule se trouve dans la dernière zone de stockage de son trajet, il est déverrouillé par défaut. Par exemple, dans la situation présentée dans la Figure 3.8, lorsque les véhicules 2, 3 et 4 sont dans la voie A, ils sont déverrouillés par défaut puisqu'ils accèdent ensuite directement à une sortie du réseau. La même règle est appliquée pour le véhicule 1 quand il se trouve dans la voie B. Dans tous les autres cas, les véhicules sont déverrouillés uniquement si les conditions suivantes sont respectées :

- Tous les véhicules qui précèdent dans la même voie sont déverrouillés,
- Aucune cellule précédente (étapes qui précèdent) n'est réservée,

- Le nombre de véhicules déverrouillés ne doit jamais dépasser la capacité réelle de la voie.

Prenons un autre exemple (voir Figure 3.10 (A)). Les véhicules 1, 2, 3 et 5 effectuent la "boucle" tandis que le véhicule 4 quitte directement le réseau en tournant à droite. Nous considérons que la voie A possède une capacité maximale réelle de trois véhicules et n'admet qu'une seule direction. Nous pouvons remarquer le respect des conditions de déverrouillage à travers la solution présentée dans la Figure 3.10 (B). Nous ajoutons la notation (v) pour indiquer un véhicule déverrouillé. Nous constatons que le véhicule 4 n'apparaît pas dans la liste et que les véhicules 1, 2 et 3 sont déverrouillés. Le véhicule 5 est verrouillé puisque le nombre de véhicules déverrouillés ne peut excéder la capacité de la voie (trois véhicules), ainsi il sera déverrouillé dès que le véhicule 1 sera autorisé à quitter la zone A, c'est-à-dire dès qu'une place sera libérée.

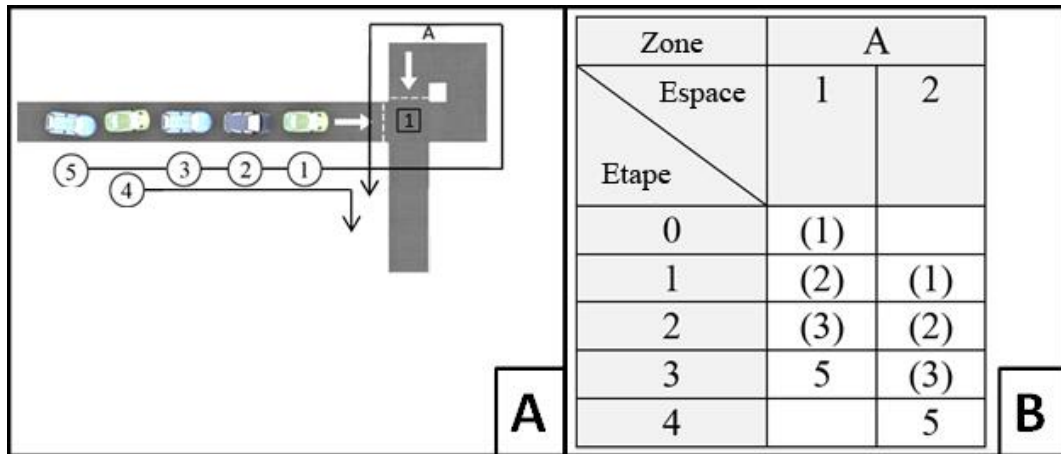


Figure 3.10 - Exemple du processus de déverrouillage des véhicules

3. Droit de passage :

Le serveur d'intersection ne prévient pas seulement les véhicules d'une collision, mais gère également l'accès aux zones voisines. Ainsi, un véhicule est capable d'obtenir le droit de passage si les trois conditions suivantes sont satisfaites :

- Il n'existe pas de risque de collision,
- L'accès à la prochaine zone n'est pas verrouillé,
- L'ordre des véhicules dans la prochaine voie est respecté.

Sous ces conditions, le manager d'intersection est capable de choisir parmi différentes séquences en fonction d'une politique donnée. Par exemple, dans le cas présenté dans la Figure 3.10, le serveur d'intersection possède de nombreux choix. En effet, les véhicules peuvent passer sous forme de convoi ou véhicule par véhicule. Par exemple, le serveur d'intersection pourrait faire sortir complètement le véhicule 1 avant d'autoriser tous les autres véhicules, ou bien stocker les véhicules 1, 2 et 3 dans la voie A pour ensuite faire passer le véhicule 4, etc. Cependant, les règles de mise à jour et de déverrouillage limitent la taille d'un convoi à trois véhicules pour rejoindre la voie

A. En effet, si le serveur d'intersection autorise plus de trois véhicules, un interblocage se produit.

3.3.4 Simulations

Ces simulations ont pour but d'évaluer notre approche en termes de prévention de l'interblocage, d'efficacité du trafic et de performance de calcul. Nous prenons en considération des latences de communication, ainsi que des pertes de paquets. Cependant, nous considérons des systèmes de positionnement précis. En effet, un positionnement fiable basé sur l'utilisation de plusieurs capteurs et méthodes est un prérequis du véhicule autonome.

On reprend le simulateur 3D de la société Voxelia pour étendre les simulations précédentes aux réseaux d'intersections (voir Figure 3.11). Le réseau étudié est une grille composée de 25 intersections connectées. La longueur des voies ainsi que la longueur des zones de stockage est de 20 mètres. Cette distance permet de stocker au maximum trois véhicules. Le principal objectif de définir des distances courtes est d'augmenter le risque de dépendance circulaire.

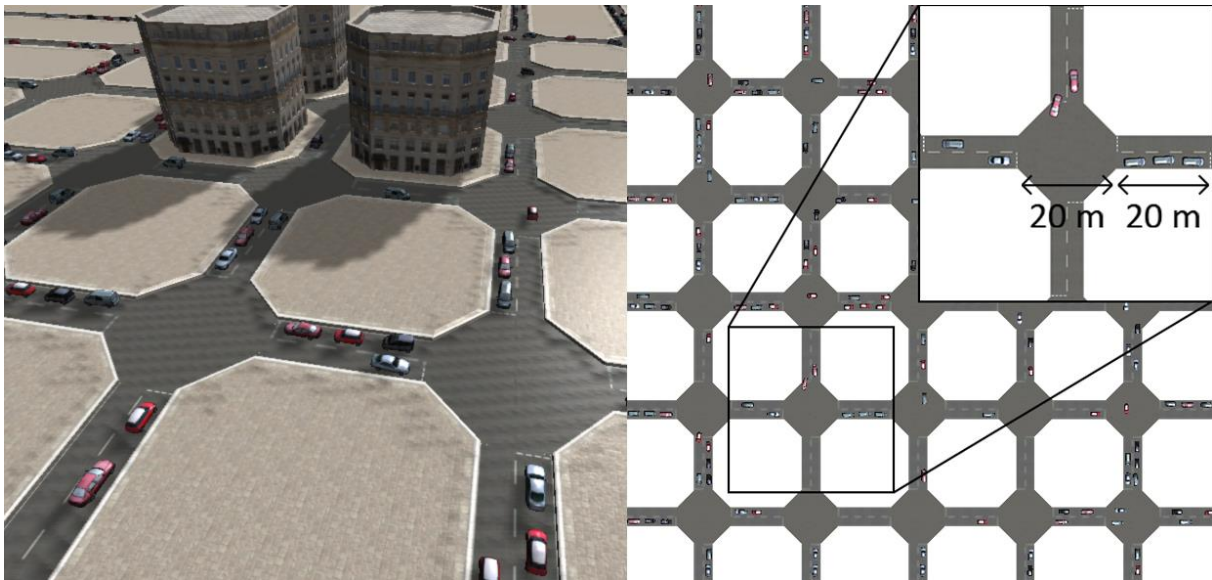


Figure 3.11 - Réseau de 25 intersections connectées en grille

3.3.4.1 Management du réseau d'intersections

Pour toutes les simulations effectuées, nous considérons que la PED (Politique d'Evacuation Distribuée) est utilisée au niveau de chaque intersection pour décider quel véhicule obtient le droit de passage. Nous rappelons très simplement les deux principales règles de cette politique :

- Si aucun risque de collision n'existe, la PED évacue le véhicule le plus tôt possible,
- La PED favorise le passage des véhicules sous forme de convoi.

La PED est utilisée parce qu'elle fournit une très bonne efficacité d'évacuation des véhicules, tout en étant résistante aux pertes de messages. De plus, on souhaite comparer les trois protocoles suivants :

1. SVAC :

La régulation est gérée de manière indépendante au niveau de chaque intersection. C'est-à-dire qu'aucun serveur de réseau n'est utilisé. De plus, les intersections ne peuvent pas communiquer entre elles. Ainsi, une intersection n'a aucune information sur la situation des intersections connectées.

2. Kanban :

La méthode Kanban respecte les contraintes d'occupation à travers l'utilisation de jetons. Chaque voie qui connecte deux intersections (zone de stockage) possède un maximum de jetons qui représente le nombre de places libres (capacité maximale en nombre de véhicules). Chaque intersection communique avec ses voisins de manière à contrôler l'occupation des voies. Un droit de passage est attribué uniquement si un jeton est disponible dans la destination désirée.

3. SVACRI :

Le SVACRI est entièrement basé sur le protocole tel qu'il a été décrit précédemment. Un serveur de réseau est responsable du respect des contraintes de réservation et d'occupation.

Le principal objectif dans la comparaison du SVACRI avec les méthodes SVAC et Kanban est d'observer la prévention de l'interblocage. En effet, Les deux derniers protocoles ne permettent pas d'éviter l'apparition des interblocages dans le cas général. De plus, lorsque tous les véhicules vont tout droit, le Kanban couplé à la PED permet d'obtenir des ondes vertes. En effet, les voies vides "appellent" le trafic jusqu'au remplissage, puis se vident à nouveau en remplissant les voies suivantes.

3.3.4.2 Séquence de génération des véhicules

Pour chaque test on génère aléatoirement l'arrivée de 5 000 véhicules, c'est-à-dire $N = 5000$. Chaque véhicule de la séquence est généré à un moment précis pour un trajet donné. A plusieurs reprises, nous comparons les trois politiques pour une même séquence. Les résultats qui suivent sont la moyenne des nombreuses simulations. Nous considérons deux événements probabilistes :

1. Nouveau véhicule dans le réseau :

La génération des véhicules dans chaque zone d'entrée du réseau suit une distribution exponentielle avec le paramètre d_{in} qui est le débit d'entrée par voie, donné en véhicules personnels par seconde par voie (vppspv), avec $in \in E_{in}$. Nous choisissons $d_{in} = 0.1$ vppspv. Nous considérons également $d_{in} = 0.5$ vppspv, pour évaluer le débit d'évacuation maximal.

2. Direction des véhicules :

A chaque intersection rencontrée, un véhicule possède une probabilité de tourner à droite, une probabilité de tourner à gauche ainsi qu'une probabilité d'aller tout droit. Les deux premières probabilités possèdent la même valeur. Ainsi, nous mentionnerons uniquement la probabilité d'aller tout droit.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait qu'une forte probabilité de tourner augmente le risque d'avoir une dépendance circulaire entre les véhicules. De plus, plusieurs véhicules

peuvent avoir de nombreux cycles sur leur trajet et effectuer des tours dans chaque cycle. Un autre phénomène est que les mouvements tournants génèrent plus de conflits. Ces phénomènes augmentent de manière significative la longueur des trajets et leur durée d'occupation dans la grille d'intersections.

3.3.4.3 Simulations VISSIM

Pour être en mesure d'évaluer l'algorithme proposé, nous avons également effectué des simulations dans VISSIM. Nous avons créé la même grille de 25 intersections, avec les mêmes paramètres géométriques, c'est-à-dire une longueur de 20 mètres pour les zones de conflit et les zones de stockage. La probabilité pour un véhicule d'aller tout droit à chaque intersection est fixée à 80% et $d_{in} = 0.1$ véhicules personnels par voie par seconde. Les simulations réalisées dans notre simulateur, sont comparées aux résultats obtenus grâce à une heure de simulation sous VISSIM. Dans VISSIM, le réseau d'intersections est régulé à travers les feux tricolores. Le temps de cycle est optimisé de manière empirique pour permettre un débit d'évacuation maximal du réseau. De plus, Les feux tricolores sont synchronisés pour maximiser le débit. Les mouvements dans les zones de conflit sont gérés à travers différents niveaux de priorité pour éviter les collisions. Plus de détails sur la régulation des zones de conflit dans VISSIM sont disponibles dans [140].

3.3.5 Résultats des simulations

Premièrement, nous avons comparé les trois politiques en considérant que tous les véhicules vont toujours tout droit (voir Figure 3.12) avec $d_{in} = 0.1$ vppspv. Le nombre de véhicules sur les courbes comprend les véhicules qui attendent dans les zones d'entrée. Nous remarquons que le protocole SVAC mène très rapidement à un interblocage. En revanche, le Kanban et le SVACRI montrent un comportement similaire. Les deux créent des ondes vertes pour évacuer les véhicules plus rapidement. Le Kanban et le protocole SVACRI permettent d'utiliser efficacement l'espace disponible dans le réseau. De plus, on remarque que le nombre de véhicules dans le réseau est stable. Une fois la génération des véhicules terminée, 2 minutes seulement sont suffisantes pour que tous les véhicules restants quittent le réseau.

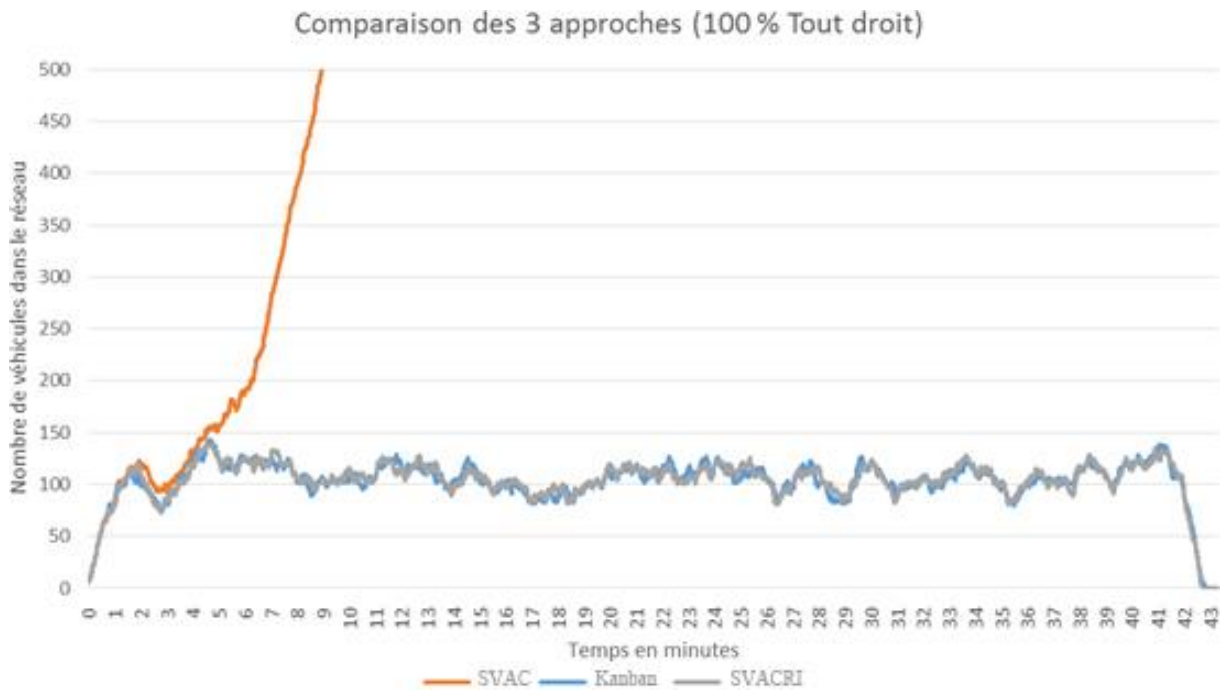


Figure 3.12 - Comparaison des protocoles SVAC, Kanban et SVACRI (100% de tout droit)

Ensuite, nous considérons que chaque véhicule possède une probabilité de 10% de tourner à gauche et une probabilité de tourner à droite de 10% également, à chaque intersection, avec $d_{in} = 0.1$ vppspv. La Figure 3.13 montre que ni le protocole SVAC, ni le protocole Kanban ne sont capables de réguler le réseau, puisqu'on remarque l'apparition d'un interblocage assez rapidement (moins de 6 minutes).

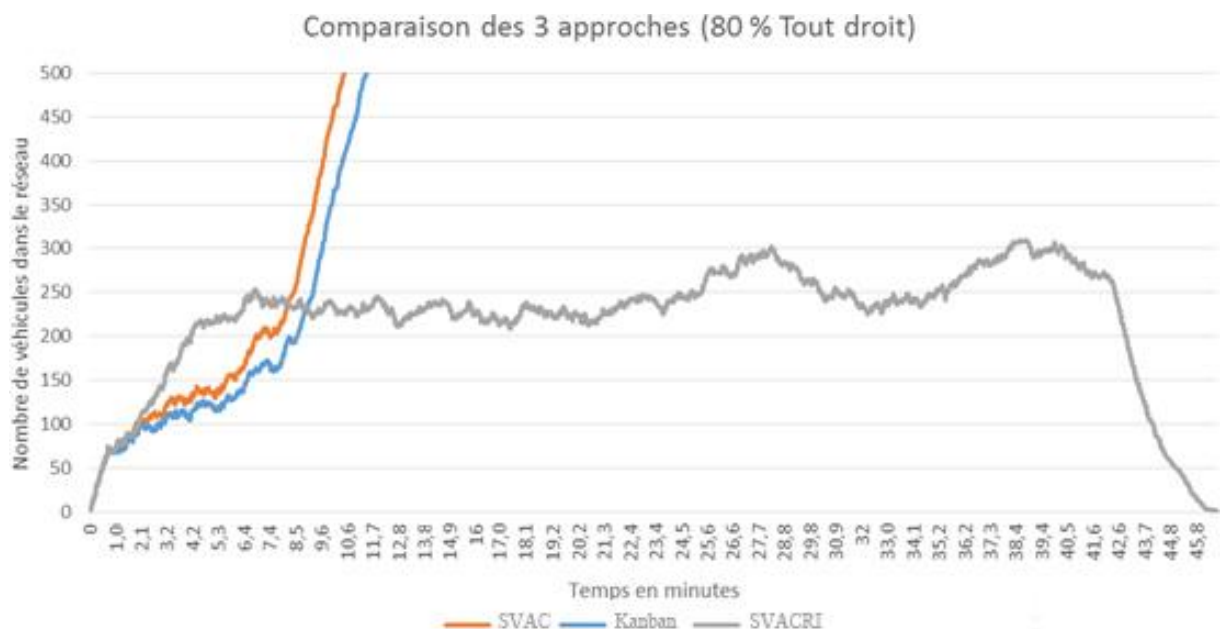


Figure 3.13 - Comparaison des protocoles SVAC, Kanban et SVACRI (80% de tout droit)

La Figure 3.14 montre que différentes probabilités de tourner à droite et à gauche n'entravent pas la politique de prévention de l'interblocage, puisque tous les véhicules sont bien évacués

du réseau. Le débit d'évacuation du réseau est relativement stable pendant la simulation, ce qui provoque une augmentation linéaire du nombre de véhicules dans le réseau.

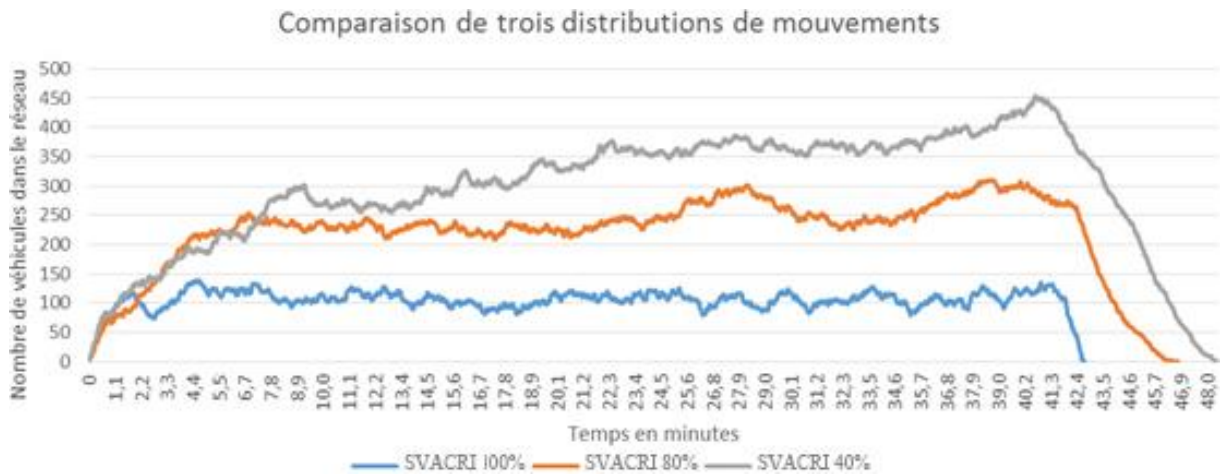


Figure 3.14 - Comparaison de trois distributions de mouvements pour le SVACRI

Nous souhaitons souligner le fait que l'augmentation du nombre de véhicules dans le réseau dans la Figure 3.13 et dans la Figure 3.14, est due aux mouvements cycliques dans la grille. Nous pouvons observer dans les deux figures que les derniers véhicules prennent plus de temps pour quitter le réseau à cause de leur trajet assez long.

Considérons maintenant la même grille d'intersections, sans mouvement tournant pour les véhicules. Si on fixe $d_{in} = 0.5$ véhicules personnels par voie par seconde, le débit d'évacuation maximum atteint 0.22 vppvps. En parallèle, une simulation VISSIM est réalisée sous les mêmes contraintes de mouvement et une régulation par feux tricolores à temps de cycle optimal. Les résultats de la simulation VISSIM sont similaires aux résultats obtenus avec l'approche proposée (SVACRI) lorsque tout le trafic va tout droit.

Pour $d_{in} = 0.1$ et 80% de chance d'aller tout droit, le débit d'évacuation est d'environ 0.089 véhicules personnels par voie par seconde. Avec le même trafic, en utilisant une régulation par feux tricolores dans VISSIM, un interblocage local se produit avant 9 minutes de simulation et un interblocage global se produit à 17 minutes. Seulement 1 122 véhicules ont été capables de quitter le réseau. Ce qui signifie que l'utilisation des feux tricolores pour réguler un tel trafic ne permet pas de lutter contre l'apparition d'un interblocage. De manière à évaluer le débit d'évacuation des feux tricolores synchronisés dans des conditions sécurisées, nous avons réduit empiriquement le débit dans VISSIM aux entrées du réseau, et réglé en conséquence le temps de cycle des feux. Le débit maximal observé sans interblocage et sans collision pendant 1 heure est de 0.055 véhicules personnels par voie par seconde. Nous constatons donc que l'approche proposée permet un gain de 62% sur la capacité d'évacuation du réseau. En d'autres termes, plus de 2436 véhicules autonomes supplémentaires par heure peuvent traverser le réseau.

3.3.6 Discussion

Jusqu'ici le trajet d'un véhicule était généré aléatoirement à partir d'une origine (voie d'entrée du réseau) et d'une destination (voie de sortie du réseau), pouvant ainsi effectuer des boucles

dans le réseau. Malgré ces boucles, la méthode de prévention de l'interblocage qui a été proposée a montré sa robustesse à travers les simulations. Nous avons pu voir également la capacité à garder un trafic fluide dans le réseau.

On souhaite maintenant optimiser le trajet d'un véhicule, toujours à partir d'une origine et d'une destination, mais avec pour objectif de trouver un enchaînement de zones capable de réduire le temps nécessaire pour quitter le réseau. Nous utilisons une technique de calcul du trajet le plus court, grâce à l'utilisation de différents paramètres.

3.4 Stratégie de routage des véhicules

On souhaite qu'un véhicule puisse trouver le meilleur trajet dans le réseau en connaissant son origine (zone d'entrée du réseau) et sa destination (zone de sortie du réseau). C'est-à-dire qu'il faut déterminer un enchaînement d'espaces permettant de passer le moins de temps possible dans le réseau. Nous proposons une modélisation du problème sous forme de graphe, de manière à pouvoir appliquer une méthode classique de calcul du trajet le plus court. Les poids sur les arcs du graphe nous permettent de définir plusieurs méthodes de calcul, en fonction de la longueur des zones, de l'occupation des véhicules et de la réservation. Des simulations ont été effectuées, dans le but d'évaluer la possibilité d'améliorer la fluidité du trafic à travers les différentes stratégies. Le travail décrit dans cette partie a été présenté dans [141].

3.4.1 Modélisation du problème

Pour trouver le chemin le plus court dans un trajet à travers un RI, on définit un graphe orienté $G_R = (V_R, A_R)$ avec des poids. V_R est l'ensemble des nœuds qui représentent les intersections du RI. A_R est l'ensemble des arcs qui représentent les routes qui connectent les intersections entre elles. Ainsi, l'arc noté $a_{i,j}$ est une zone de stockage qui permet d'aller de l'intersection i vers l'intersection j . A chaque arc $a_{i,j}$ on associe un poids $w_{i,j}$. Un exemple de représentation sous forme de graphe d'un réseau à quatre intersections est donné dans la Figure 3.15. Nous souhaitons également considérer le temps nécessaire pour qu'un véhicule puisse traverser une intersection. Ainsi, on définit r_i la pénalité pour traverser l'intersection i . Nous définissons également le paramètre r_v qui représente une pénalité de présence des véhicules dans une file d'attente. C'est-à-dire que chaque véhicule supplémentaire se trouvant en fin de file d'attente ajoute une pénalité.

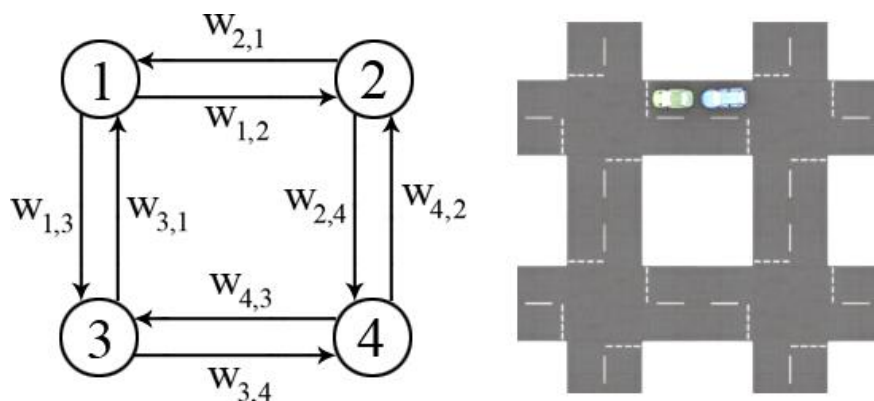


Figure 3.15 - Exemple de représentation sous forme de graphe d'un RI

On utilise un algorithme classique de calcul du plus court chemin, de manière à trouver le meilleur trajet possible pour chaque origine / destination (OD), en fonction du poids des arcs. Trois politiques sont étudiées, celles-ci diffèrent dans leur approche du calcul du poids des arcs du graphe. Dans la suite, nous considérons que dans chaque cellule vide, le temps de trajet dépend de la distance. En effet, la limite de vitesse est la même pour tous les segments.

3.4.2 Politiques de calcul du plus court chemin

Nous proposons trois politiques de calcul du plus court chemin à travers le calcul du poids des arcs. Celui-ci est calculé en fonction de la distance, puis en fonction de la réservation des véhicules dans les zones de stockage, et enfin en fonction de l'occupation en temps-réel des véhicules dans les zones de stockage.

3.4.2.1 Routage par distance

La Politique de Routage par Distance (PRD) est basée sur la longueur réelle des segments de route. Le calcul du poids d'un arc est donné par :

$$w_{i,j} = r_v * cap_{i,j} \quad (3.7)$$

Avec $cap_{i,j}$ la capacité réelle de la zone de stockage (en nombre de véhicules) qui connecte l'intersection i vers l'intersection j .

3.4.2.2 Routage par réservation

La Politique de Routage par Réservation (PRR) est basée sur la réservation des véhicules à travers le protocole SVACRI. Le but est de pénaliser un trajet sur lequel de nombreux véhicules ont déjà réservé l'espace. Le poids d'un arc est calculé de la manière suivante :

$$w_{i,j} = r_v * (cap_{i,j} + res_{i,j}) \quad (3.8)$$

Avec $res_{i,j}$ est le nombre de véhicules ayant réservé la zone de stockage qui connecte l'intersection i vers l'intersection j . Nous rappelons que le nombre de réservations peut dépasser la capacité de la zone. Ainsi on compte le temps nécessaire à traverser chaque zone du trajet, plus le temps perdu pour faire passer tous les véhicules ayant réservé.

3.4.2.3 Routage par congestion

La Politique de Routage par Congestion (PRC) est basée sur l'observation des véhicules se trouvant à l'arrêt dans le réseau. L'objectif est d'éviter un trajet qui comporte des routes congestionnées, or la congestion se traduit par un ralentissement des véhicules, voire un arrêt total. Le poids d'un arc est donné par :

$$w_{i,j} = \beta - cg_{i,j} \quad (3.9)$$

Où β est la borne supérieure du poids et $cg_{i,j}$ définit le niveau de congestion de la zone de stockage qui connecte l'intersection i vers l'intersection j . Le niveau de congestion au temps $t + 1$ est donné par :

$$cg_{i,j}(t + 1) = \alpha * \left(\frac{1}{st_{i,j}(t)} \right) + (1 - \alpha) * ct_{i,j}(t) \quad (3.10)$$

Avec $\alpha \in]0,1[$ et $st_{i,j}$ représente le temps total d'arrêt des véhicules se trouvant dans la zone de stockage qui connecte l'intersection i vers l'intersection j . Ce temps est calculé comme ceci :

$$st_{i,j} = \max\left(\sum_{v=1}^N st_v, \frac{1}{\beta}\right) \text{ pour } z_v = (i,j) \quad (3.11)$$

Avec st_v est le temps de stop du véhicule v dans la zone actuellement occupée z_v .

3.4.3 Simulations et résultats

Les simulations sont basées sur le même réseau de 25 intersections que pour les tests précédents (voir Figure 3.11). Nous rappelons que les zones de conflit et les zones de stockage ont une longueur de 20 mètres, offrant une capacité réelle d'accueil de trois véhicules. De plus on reprend le principe de comparaison par création d'une séquence de génération de N véhicules avec d_{in} le débit de la zone d'entrée in en véhicule personnels par voie par seconde (vppvps).

On modélise le réseau de 25 intersections sous forme de graphe (voir Figure 3.16). Les nœuds de couleur noire représentent les extrémités du réseau, dans lesquelles les véhicules entrent et sortent. Les nœuds blancs représentent les intersections. De plus, les arcs qui connectent les nœuds noirs ne sont pas soumis à un poids. Nous notons $E_{in} = E_{out}$ un nœud de couleur noire, avec in l'indice de la zone d'entrée et out l'indice de la zone de sortie du réseau.

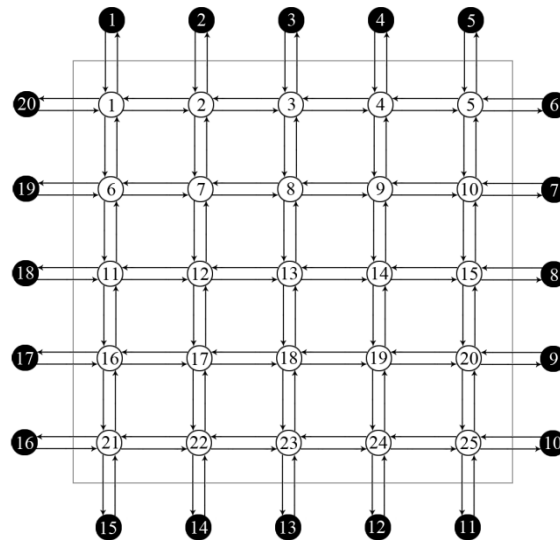


Figure 3.16 - Représentation sous forme de graphe d'un réseau de 25 intersections en grille

Il est important de souligner le fait que les résultats dépendent de la justesse de l'estimation des paramètres de pénalité r_i et r_v . Une phase de simulation a donc été nécessaire pour calibrer les valeurs au mieux.

Dans la suite, nous nous intéressons en particulier à deux critères du trafic, le débit et l'homogénéité de la distribution du trafic aux entrées.

3.4.3.1 Faible débit et distribution du trafic homogène

Pour cette comparaison, nous fixons $N = 5000$ et $d_{in} = 0.05$ pour tout in . Comme le trafic est distribué de manière homogène, la probabilité $prob_{in,out}$ qu'un véhicule effectue un trajet de l'entrée in vers la sortie out du réseau est donnée par :

$$prob_{in,out} = \begin{cases} 0 & \text{si } in = out \\ \frac{1}{|E_{in}| - 1} & \text{si } in \neq out \end{cases} \quad (3.12)$$

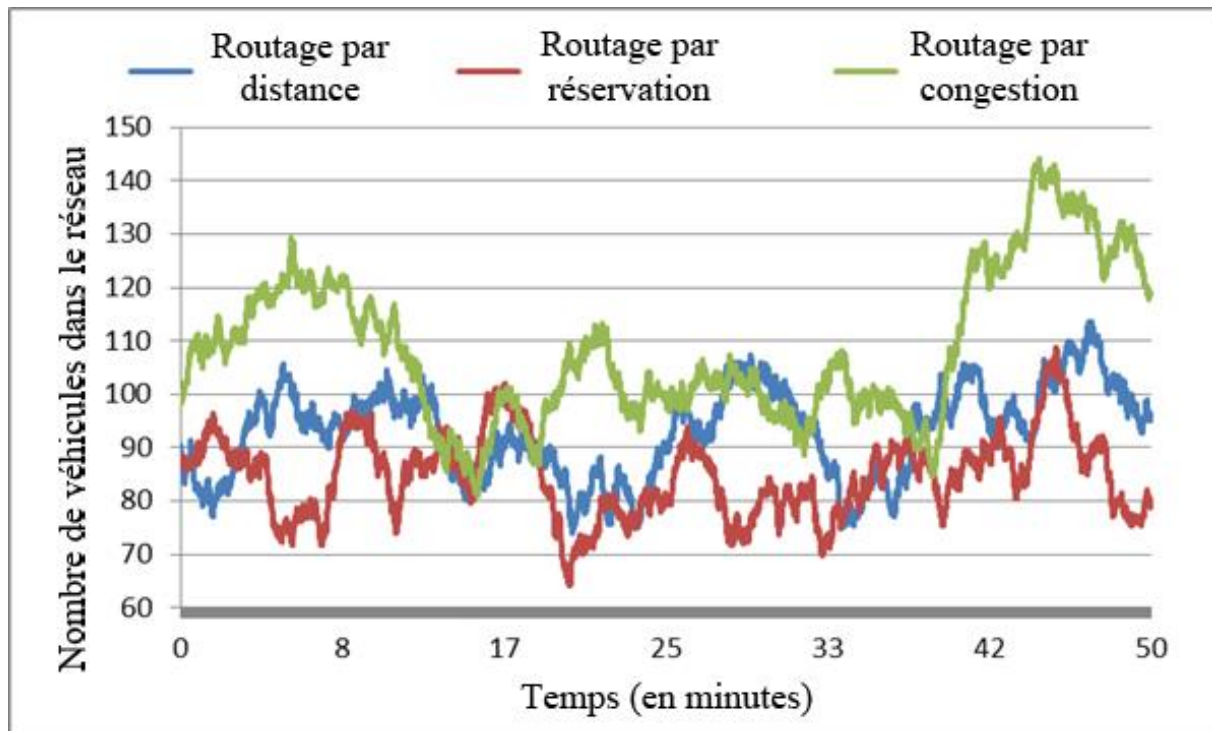


Figure 3.17 - Comparaison des politiques de routage : faible débit, trafic homogène

Les résultats de la simulation nous permettent de tirer plusieurs observations (voir Figure 3.17):

- La PRC est la moins bonne des trois politiques, avec un pic à 145 véhicules dans le réseau et un minimum de 80 véhicules. Nous remarquons notamment que cette politique est instable en début et en fin de simulation,
- La PRR est la méthode la plus efficace avec un minimum de 65 véhicules, et un pic à 110 véhicules,
- La PRD présente un résultat intermédiaire avec un minimum de 75 véhicules pour un maximum de 115 véhicules,
- La PRR et la PRD sont stables au cours du temps.

3.4.3.2 Fort débit et distribution homogène du trafic

Comme pour la comparaison précédente, on fixe $N = 5000$ et $prob_{in,out}$ est définie par (3.12). Cependant, le débit de génération des véhicules est fixé au maximum théorique avec $d_{in} = 0.5$ pour tout in .

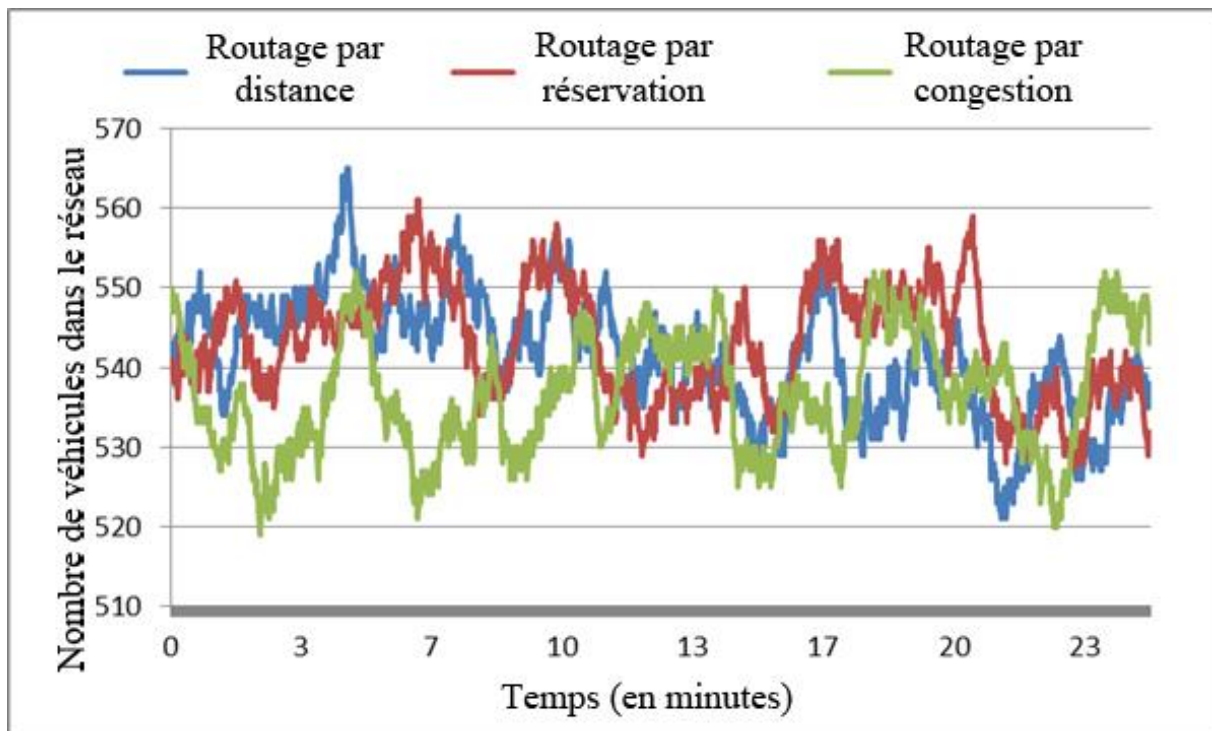


Figure 3.18 - Comparaison des politiques de routage : fort débit, trafic homogène

Les résultats de la simulation sont présentés dans Figure 3.18. Les observations sont les suivantes :

- La différence entre les trois politiques est moins marquée que pour un faible niveau de trafic,
- La PRC est la plus efficace, en particulier en début de simulation, avec un minimum de 520 véhicules pour un maximum de 550 véhicules. En revanche en fin de simulation la PRC semble équivalente aux autres politiques. On note que cette politique est stable au cours du temps,
- La PRD présente un minimum de 520 véhicules pour un maximum de 565 véhicules,
- La PRR atteint son maximum à 560 véhicules et son minimum à 527,
- La PRD et la PRR sont assez proches en termes d'efficacité. On remarque cependant une variation légèrement plus grande pour la PRD. Ces deux politiques ne sont pas stables, en effet nous constatons une amélioration au cours de la simulation d'environ 10 véhicules.

3.4.3.3 Faible débit et distribution du trafic non homogène

Le paramètre N est fixé à 1000 véhicules. Pour le débit de génération des véhicules, nous fixons :

$$d_{in} = \begin{cases} 0.15 & \text{si } in = 2 \\ 0.02 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

La probabilité de rejoindre les sorties du réseau est définie par :

$$prob_{in,out} = \begin{cases} 0 & \text{si } in = out \\ 1 & \text{si } in = 2 \text{ and } out = 12 \\ \frac{1}{|E_{in}| - 1} & \text{si } in \neq out \end{cases} \quad (3.14)$$

Le choix des paramètres signifie que chaque véhicule qui se présente à l'entrée 2 du réseau, doit obligatoirement rejoindre la sortie 12 du réseau. De plus, l'entrée 2 présente un débit important, contrairement aux autres entrées. Le but de cette simulation est de tester chaque politique dans un contexte non homogène de distribution du trafic avec l'existence d'un axe principal de circulation. Le choix de l'origine / destination n'est pas anodin, en effet on remarque sur le graphe du réseau qu'il existe de nombreux chemins possibles et équivalents en distance (voir Figure 3.16).

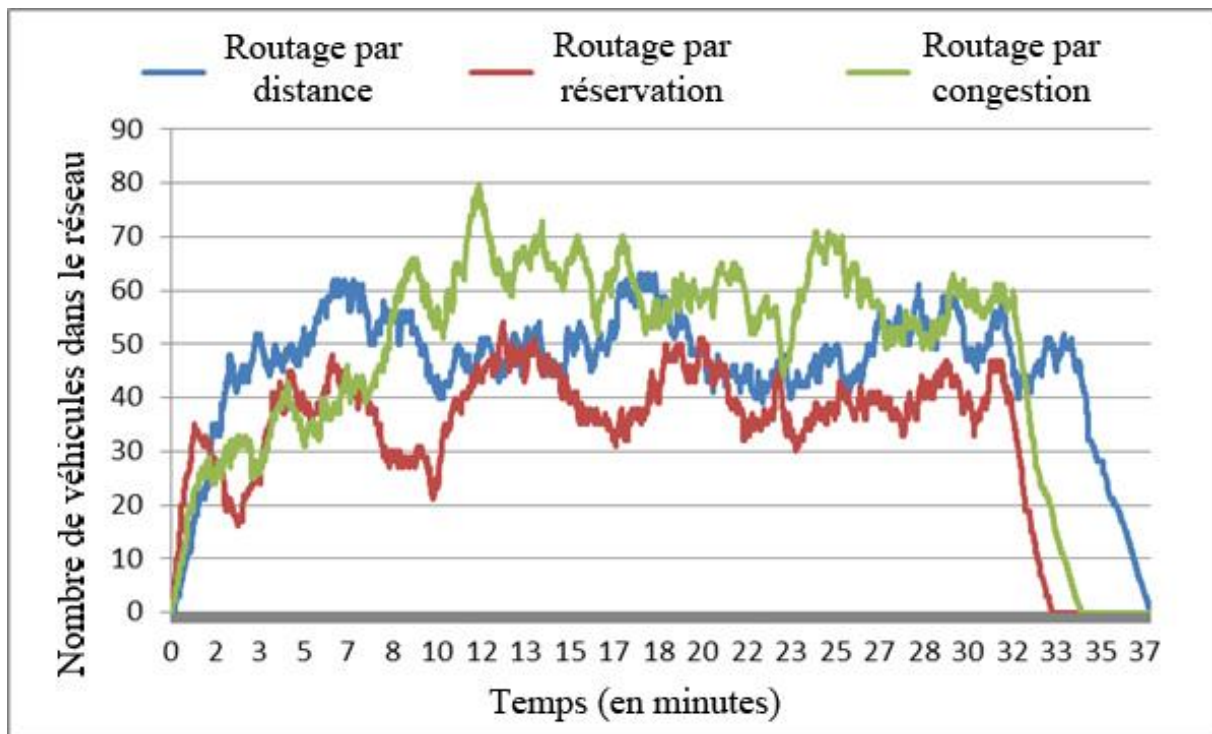


Figure 3.19 - Comparaison des politiques de routage : faible débit, trafic non homogène

Les résultats sont présentés dans Figure 3.19. Nous constatons plusieurs points importants :

- Les courbes sont assez similaires au test homogène sous faible trafic (voir Figure 3.17),
- La PRR est la plus efficace avec un temps d'évacuation total d'environ 33 minutes. Elle est également relativement stable,
- La PRD est assez stable, malheureusement le temps nécessaire pour évacuer tous les véhicules est d'environ 37 minutes, ce qui en fait la politique la plus mauvaise pour ce test,
- La PRC semble moins stable que les autres politiques, en effet elle est très efficace au début de la simulation, puis atteint un maximum de 80 véhicules pendant que les autres politiques ne dépassent pas 64 véhicules. Cependant, la PRC évacue très

rapidement les véhicules en fin de simulation pour finalement vider le réseau au bout d'environ 34 minutes.

3.4.3.4 Synthèse

La synthèse des simulations présentées donne le nombre moyen de véhicules dans le réseau pour chaque politique et pour chaque test (voir Tableau 3.1). De plus, nous donnons la déviation standard ainsi que la longueur moyenne des trajets pour permettre une analyse complémentaire des méthodes.

Conditions du test	Politique	Nombre moyen de véhicules dans le réseau	Déviation standard	Longueur moyenne des trajets en nombre d'intersections traversées
Faible débit Trafic homogène	Distance	92,98	8,42	4,9914
	Réservation	84,71	7,73	4,9962
	Congestion	108,43	13,96	5,1848
Fort débit Trafic homogène	Distance	541,54	7,50	5,0294
	Réservation	543,10	7,21	4,9830
	Congestion	536,72	7,41	5,1032
Faible trafic Trafic non homogène	Distance	49,97	5,51	5,4550
	Réservation	38,08	8,34	5,5220
	Congestion	55,26	11,50	5,9620

Tableau 3.1 - Synthèse de la comparaison entre les politiques de routage

La synthèse nous confirme que l'efficacité et la stabilité de chaque méthode dépend fortement de la situation du trafic (débit, homogénéité de la distribution, etc.). Cependant, les méthodes par réservation (PRR) et par congestion (PRC), semblent donner de meilleurs résultats que la méthode par distance (PRD), en tirant avantage de la connaissance de l'occupation actuelle ou future des zones de stockage. De plus, on peut voir que modifier les trajets en fonction du niveau de congestion augmente le nombre moyen d'intersections traversées, et par conséquent le temps d'occupation des véhicules. Modifier l'itinéraire d'un véhicule représente donc en général un déplacement du problème.

Conclusion

Nous avons proposé un nouveau protocole (SVACRI) capable de prévenir l'apparition d'un interblocage dans un réseau d'intersections, grâce à un ensemble de règles simples. Le principe consiste à assurer la réservation du trajet d'un véhicule dans le réseau. Ainsi tout chemin qui ne peut pas joindre une entrée et une sortie du réseau par rapport aux trajets déjà réservés, est repoussé dans le temps jusqu'à être valide.

Les tests en simulation sur un réseau de 25 intersections avec un trafic dense, ont permis de montrer la capacité à prévenir l'interblocage. De plus, le débit de sortie ne souffre pas de l'ajout des règles de prévention.

Nous avons également proposé une comparaison entre trois méthodes de routage des véhicules, de manière à tester la possibilité d'améliorer le débit de sortie du réseau. Les trois

politiques de routage sont basées sur la recherche du chemin le plus court. Une méthode se base simplement sur la distance parcourue, une sur le niveau actuel de congestion, et la dernière sur le niveau de réservation des trajets.

Les comparaisons ont révélé que détourner un véhicule de son trajet initial n'est pas nécessairement une bonne solution pour améliorer le débit, pour plusieurs raisons :

- Un trajet modifié risque d'augmenter le nombre d'intersections traversées.
- En observant la congestion d'une route en entrant dans le réseau, tous les véhicules vont être détournés de cette route, ainsi la route congestionnée va se vider entièrement, tandis que des congestions se forment ailleurs.
- Modifier les trajets peut augmenter le nombre de croisements entre les véhicules. En effet détourner un flux de véhicules ayant la même destination sous forme de deux flux résulte forcément en un croisement avant la sortie du réseau.

Il apparait donc que détourner les véhicules par rapport à la congestion actuelle doit être utilisé le moins possible puisqu'on modifie le futur par rapport à un instant présent. Il semble donc plus intéressant d'observer les réservations dans le temps pour avoir une estimation plus réaliste de la situation future. En revanche il est toujours intéressant de considérer les distances pour tenter de réduire la longueur d'un trajet.

Compte tenu des observations et des conclusions, il sera cohérent d'améliorer la méthode d'évitement de l'interblocage en optimisant directement le trajet de chaque véhicule lors de l'ajout dans la matrice des conflits. Par exemple en appliquant un algorithme du plus court chemin basé directement sur le parcours des cellules de la matrice. De plus la méthode devra être testée sur un réseau différent d'un réseau sous forme de grille pour vérifier la mesure des débits dans le cas où les voies de stockage n'ont pas des tailles identiques.

Une autre question mérite d'être abordée, il s'agit des parkings dans un réseau d'intersections. En effet le protocole considère qu'un véhicule effectue son trajet et sort du réseau, or dans le cas d'un parking le véhicule peut rester pendant un temps indéterminé à l'intérieur du réseau.

CHAPITRE N°4. REGULATION D'UNE INTERSECTION DE VEHICULES AUTONOMES

Introduction

Dans les chapitres précédents, nous considérons une régulation simple à base de signalisation individuelle de type vert / rouge. De plus on rappelle que deux véhicules qui effectuent des mouvements conflictuels ne peuvent pas obtenir le droit de passage au même moment. En effet, les protocoles SVAC (voir Chapitre 2) et SVACRI (voir Chapitre 3) sont conçus initialement pour des conducteurs humains. Dans ce chapitre, on souhaite étendre la régulation du trafic aux véhicules autonomes, en profitant de leur potentiel de contrôle sur la vitesse, en particulier grâce à l'utilisation d'un système CACC (Cooperative Adaptive Cruise Control) que nous appellerons en français RCAV (Régulateur Coopératif Adaptatif de Vitesse). L'objectif est double, le protocole doit assurer qu'aucune collision n'est possible tout en permettant d'augmenter la capacité d'évacuation de l'intersection.

La littérature montre qu'un véhicule coopératif entièrement contrôlé doit offrir de meilleures performances. Le principal avantage par rapport au conducteur humain est le gain de temps possible entre la traversée de deux véhicules successifs. Par exemple dans [101], les auteurs proposent un principe de réservation espace / temps que chaque véhicule contrôlé doit respecter de manière stricte. Dans [89], la méthode proposée consiste à contrôler la trajectoire de véhicules équipés d'un système RCAV. Chaque véhicule doit ainsi respecter une indication de vitesse transmise par un serveur d'intersection. Cependant, si dans la théorie ces méthodes offrent des résultats très prometteurs, dans la réalité un certain nombre de contraintes doivent être prises en compte pour assurer la sécurité et la faisabilité. En effet, dans ces méthodes, la ponctualité des véhicules est primordiale, tout particulièrement pour le principe de réservation. On peut également noter le risque de l'envoi des indications de vitesses par le serveur, puisqu'un problème de communication peut conduire à une perte de message de décélération. Une indication de décélération qui n'est pas reçue ne sera pas respectée.

Un certain nombre de tests avec des mini-robots, ainsi que des tests réels [107,104,105,116] ont contribué à mettre en avant certaines questions techniques importantes. En effet il en résulte que les véhicules ne sont pas aussi contrôlables que prévu. De plus, l'évitement de la collision dépend fortement de la vitesse et du temps passé dans la zone de conflit. En d'autres termes, il existe un fort risque de collision si le temps entre deux véhicules qui se croisent est très petit, tandis que les performances sont compromises dans le cas d'un temps plus grand, sans pour autant éliminer les risques de collision.

L'objectif du chapitre est de proposer un nouveau protocole basé sur le protocole SVAC, permettant d'appliquer une méthode de synchronisation des vitesses sur des véhicules contrôlés. Nous nous intéressons également à la commande de l'accélération du véhicule. La faisabilité et l'efficacité sont testées à travers une intersection de mini-robots ainsi que des simulations.

Après une présentation du protocole, nous proposons une méthode de calcul de l'accélération basé sur le modèle de suivi de véhicule existant appelé IDM (Intelligent Driver Model). Ensuite nous définissons une nouvelle méthode d'adaptation de la vitesse plus adaptée au problème du temps de réaction d'un système autonome. En effet, la stabilité du suivi de véhicule à base de l'écart temps inter-véhiculaire, suppose une borne maximale de temps de réaction qui n'est pas nécessairement respectée par la communication des positions.

4.1 Implémentation (Management d'Intersection Transparent)

Nous proposons un protocole appelé Management d'Intersection Transparent (MIT), celui-ci a été présenté dans [142,143]. Le protocole MIT est basé sur la séquence et est considéré comme un Système Multi-Agent (Multi-Agent System (MAS)). Ainsi les clients (véhicules) négocient l'accès à la zone de conflit de l'intersection auprès du serveur d'intersection en utilisant le type de communication V2I.

Le protocole MIT est inspiré du protocole SVAC (voir Chapitre n°2). Toutefois, contrairement au protocole SVAC qui traite le droit de passage sous forme d'une indication de type vert / rouge, le protocole MIT le considère différemment. Ainsi, tout véhicule se trouvant dans la séquence de passage obtient l'autorisation de traverser l'intersection, même si son mouvement se trouve en conflit avec d'autres véhicules, mais à condition de respecter l'ordre de passage. C'est-à-dire qu'un véhicule doit passer après les véhicules se trouvant avant lui dans la séquence, en tentant d'adapter au mieux sa vitesse, d'une part pour éviter toute collision et d'autre part pour améliorer le temps passé dans la zone de conflit.

De manière à profiter au mieux de la capacité d'adaptation de la vitesse des véhicules, on reconsidère le zonage avec un découpage spécifique de la zone de conflit. L'architecture de communication propose quelques modifications également par rapport au protocole SVAC de manière à fournir aux véhicules toutes les informations nécessaires. La stratégie de régulation est basée sur le respect d'une séquence de passage. Cependant, il est nécessaire de définir clairement la commande qui permet à chaque véhicule d'adapter sa vitesse par rapport aux autres véhicules et par rapport à l'intersection.

4.1.1 Zonage

Le zonage du protocole MIT reprend le principe de zonage du protocole SVAC (voir 2.1.1), c'est-à-dire un découpage sous forme de zones de stockage, de zones de sortie et d'une zone de conflit. Cependant dans le protocole SVAC, l'unique zone de conflit est délimitée par les lignes de stop des voies, nous l'appellerons zone globale de conflit (ZGC). Or grâce aux véhicules contrôlés, il est possible de reconsidérer le partage des ressources dans la ZGC. Ainsi nous proposons un découpage en plusieurs zones locales de conflit (ZLC) qui correspondent aux différents croisements possibles. Par exemple, la Figure 4.1 propose un découpage en seize ZLC pour une intersection complexe à douze entrées et douze sorties. Nous soulignons le fait qu'une ZLC peut prendre différentes formes, en fonction des angles des mouvements, ainsi que différentes tailles. En effet, une ZLC doit couvrir exactement la zone critique de manière à optimiser l'utilisation de l'espace. De plus, nous considérons que chaque véhicule doit connaître les conflits entre les mouvements ainsi que les ZLC, pour être

capable de s'arrêter avant n'importe quelle ZLC. On remarque également qu'un mouvement peut traverser plusieurs ZLC.

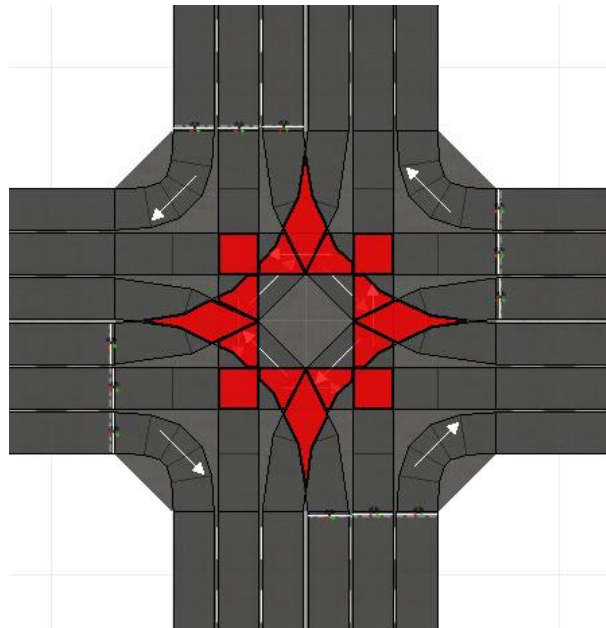


Figure 4.1 - Découpage de la zone globale de conflit d'une intersection en zones locales de conflit

4.1.2 Architecture de communication

Le protocole MIT possède une architecture de communication similaire au protocole SVAC (voir 2.1.3), puisqu'elle est également basée sur l'utilisation d'un serveur d'intersection qui permet de réguler les véhicules à travers l'envoi d'une séquence de passage. Chaque véhicule doit donc négocier le droit de passage auprès du serveur (voir Figure 4.2).

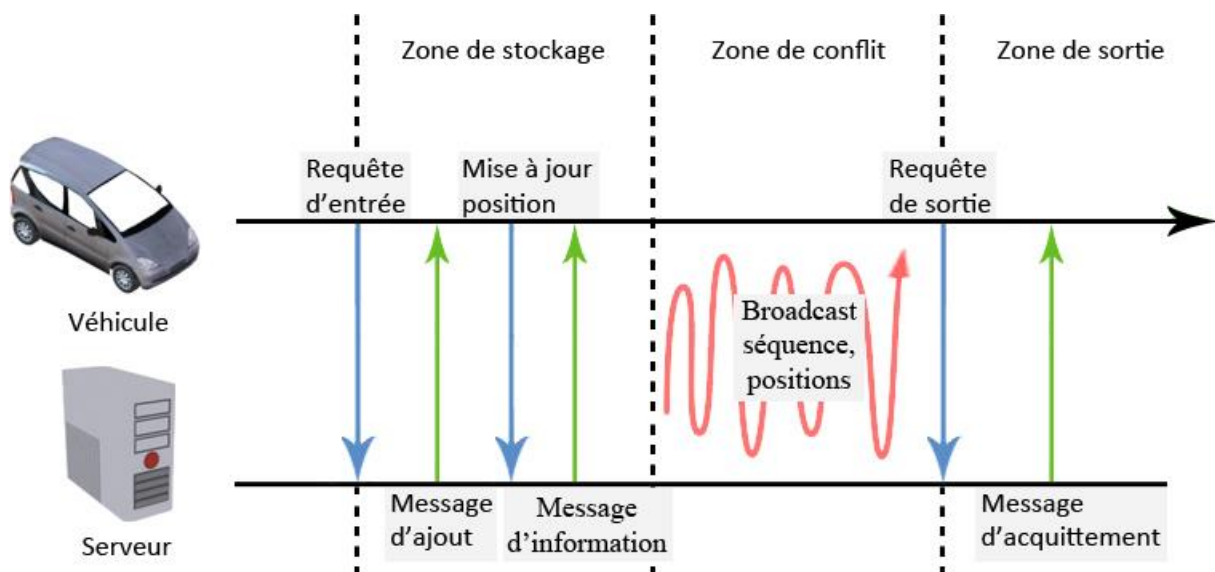


Figure 4.2 - Architecture de communication du protocole MIT

4.1.2.1 Rôle du serveur

La tâche du serveur est de récolter les informations des véhicules, dans le but de construire une séquence de passage qui doit être strictement respectée par ceux-ci. En plus de la séquence de passage, le serveur envoie régulièrement les positions et les vitesses de tous les véhicules présents dans l'intersection.

4.1.2.2 Rôle du véhicule

De la même manière que pour le protocole SVAC, un véhicule qui entre dans une intersection doit envoyer une **requête d'entrée** au serveur d'intersection pour qu'il soit ajouté à la séquence de passage. Le véhicule doit également envoyer une **requête de sortie** pour informer de la libération de l'occupation de la zone de conflit.

L'adaptation de la vitesse de chaque véhicule dépend de la séquence de passage, mais également de la position et de la vitesse de chaque véhicule se trouvant avant lui dans celle-ci. Ainsi un véhicule doit envoyer le plus souvent possible les informations concernant sa position précise par rapport aux ZLC, mais également sa vitesse.

4.1.3 Stratégie de régulation

Le principe général de la stratégie de régulation proposée est d'assimiler le croisement de deux véhicules à un suivi classique dans la même voie (voir Figure 4.4). En effet, que les véhicules se trouvent dans la même voie, ou qu'ils se trouvent dans des voies conflictuelles, on peut considérer un véhicule suiveur et un véhicule leader. Le véhicule suiveur adapte sa vitesse en fonction des informations concernant la position et la vitesse du véhicule leader. Or, dans le protocole MIT, chaque véhicule possède les informations sur l'ordre de passage à respecter, mais également sur les positions et les vitesses des véhicules prédécesseurs se trouvant dans des voies conflictuelles. Grâce à ces informations, les véhicules doivent adapter leur vitesse de manière sécurisée et optimale par rapport à la zone locale de conflit et par rapport au confort des passagers. En effet il peut être important de s'assurer que l'accélération et le freinage d'un véhicule ne dépassent pas certains seuils même en cas de freinage brusque du véhicule qui précède. Pour permettre une évacuation plus rapide de l'intersection, on sait qu'un véhicule doit passer le minimum de temps à l'intérieur de la zone de conflit, ce qui se traduit par un passage à une vitesse élevée. Cependant, la vitesse augmente sensiblement les risques de collisions, il faut donc trouver un compromis entre la sécurité et l'efficacité.

La stratégie de régulation va être abordée en deux points. Le premier point décrit la manière dont sont considérées les positions et les vitesses des autres véhicules. En effet, celles-ci sont transmises par message par les systèmes de communication, or ceux-ci peuvent présenter des problèmes de délais. Le deuxième point s'intéresse au calcul de la commande d'accélération en fonction des différents obstacles. La suite du chapitre s'appuie sur la définition d'un certain nombre de paramètres (voir Tableau 4.1).

Paramètre	Signification	Valeur
v_{max}	Vitesse maximale	14 m s^{-1}
s_0	Distance minimum	2 m
a	Accélération maximale désirée	2 m s^{-2}
b_f	Décélération désirée du véhicule suiveur	-2 m s^{-2}

b_l	Décélération maximale du véhicule leader	-15 m s^{-2}
l_f	Longueur du véhicule suiveur	5 m
l_l	Longueur du véhicule leader	5 m
a_f	Accélération du véhicule suiveur	
a_l	Accélération du véhicule leader	
v_f	Vitesse du véhicule suiveur	
v_l	Vitesse du véhicule leader	
v_l'	Vitesse estimée du véhicule leader	
x_f	Position du véhicule suiveur	
x_l	Position du véhicule leader	
x_l'	Position estimée du véhicule leader	
x_f^{zlc}	Position d'une ZLC pour le véhicule suiveur	
x_l^{zlc}	Position d'une ZLC pour le véhicule leader	
s^{zlc}	Taille d'une ZLC	

Tableau 4.1 - Paramètres pour la politique MIT

4.1.3.1 Estimation des positions et des vitesses

Nous considérons ici qu'un véhicule suiveur se trouve dans une voie conflictuelle par rapport au véhicule leader, ainsi seul le croisement représente un danger (dans la ZLC). Pour une question de sécurité un véhicule suiveur doit toujours se baser sur la dernière position connue et la dernière vitesse connue du véhicule qui précède. En effet, dans le cas d'un arrêt du serveur d'intersection, un véhicule suiveur ne reçoit plus d'information concernant le véhicule prédécesseur, ce dernier peut donc se trouver n'importe où et à n'importe quelle vitesse. Cependant, nous considérons que dans le pire des cas, le véhicule qui précède a effectué un freinage d'urgence, il est donc possible d'estimer une position et une vitesse en fonction de la date des dernières informations reçues (voir Figure 4.3). De plus, la position du véhicule leader peut être calculée par rapport à la zone locale de conflit, qui correspond au croisement entre les mouvements du véhicule suiveur et du véhicule leader.

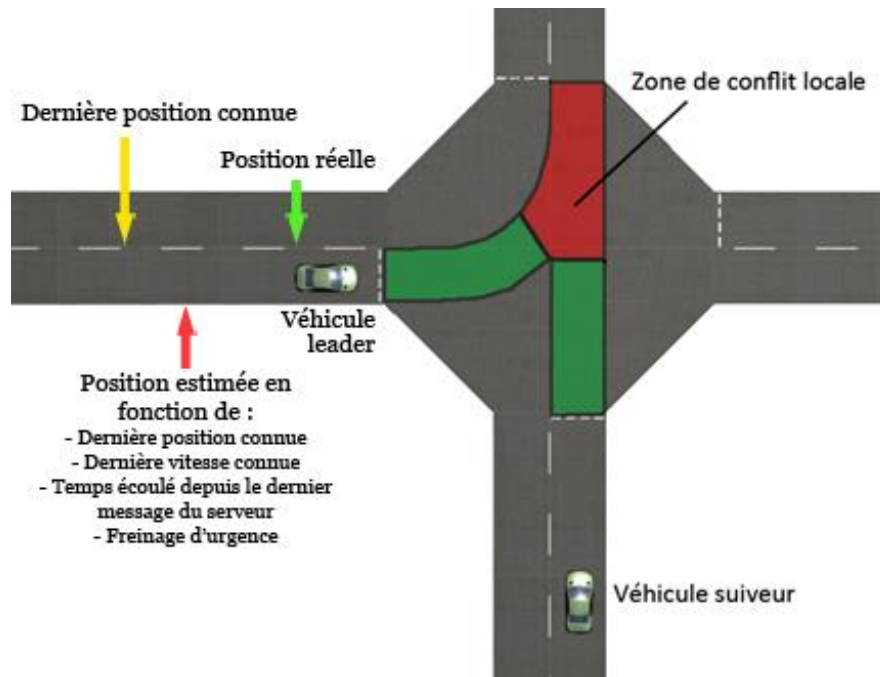


Figure 4.3 - Considération du véhicule leader par le véhicule suiveur dans le protocole MIT

Dans le cas d'un croisement, le véhicule suiveur possède les informations v_l et x_l qui sont respectivement la vitesse du leader et à sa position par rapport à l'entrée de la zone de stockage. On peut considérer que les informations sont accompagnées de la date à laquelle elles ont été enregistrées, en supposant que les dates du serveur et des véhicules soient synchronisées. Ainsi, à partir du temps t_s écoulé depuis la date des informations reçues, on peut estimer $v'_l = \max(0, v_l - b_l * t_s)$ et $x'_l = x_l + \frac{(v_l + v'_l)}{2} * t_s$, respectivement la vitesse estimée du leader et sa position estimée, en considérant un freinage d'urgence. Nous définissons également $\Delta v' = v_f - v'_l$ qui représente la différence de vitesse estimée entre le véhicule suiveur et le véhicule leader.

4.1.3.2 Gestion des obstacles

Le véhicule doit être capable d'adapter sa vitesse par rapport aux véhicules se trouvant sur la même voie, mais également par rapport aux véhicules des voies conflictuelles et par rapport aux zones locales de conflit. Ainsi nous considérons deux types d'obstacles :

- Virtuel : on définit deux types d'obstacles virtuels. Le premier est un obstacle virtuel préprogrammé (OVP) qui représente le début d'une zone locale de conflit. Le second obstacle virtuel peut être n'importe quel véhicule qui précède dans la séquence, et évoluant dans des voies conflictuelles, on l'appelle obstacle virtuel de séquence (OVS). Ces obstacles sont donnés par le serveur à travers la séquence de passage,
- Réel : chaque véhicule doit être équipé avec des capteurs tels que des radars frontaux, pour pouvoir détecter les obstacles réels (OR) comme par exemple un véhicule qui précède dans la même voie.

Le calcul de l'accélération d'un véhicule se base sur trois accélérations en fonction des différents obstacles:

- a_r : accélération qui dépend de la détection des obstacles réels, c'est-à-dire de la distance renvoyée par les radars frontaux,
- a_{vp} : accélération qui doit être appliquée pour respecter un obstacle virtuel préprogrammé (début d'une zone locale de conflit).
- a_{vs} : accélération calculée par rapport à un obstacle virtuel de séquence.

Ces accélérations seront calculées grâce à la distance s de l'obstacle. Il est donc nécessaire de définir trois types de distance:

- s_r : distance de l'obstacle réel (mesure des radars frontaux),
- s_{vp} : distance d'un obstacle virtuel préprogrammé, c'est-à-dire de l'entrée d'une zone de conflit,
- s_{vs} : distance d'un obstacle virtuel de séquence.

L'accélération a_{vs} est donnée par :

$$a_{vs} = \min(a_{vs,1}, \dots, a_{vs,n_{vs}}) \quad (4.1)$$

Avec $a_{vs,i}$ définie l'accélération calculée en fonction du $i^{\text{ème}}$ obstacle virtuel qui précède dans la séquence et n_{vs} le nombre d'obstacles virtuels. Grâce au résultat de l'équation (2.12) nous connaissons le "pire" obstacle virtuel de séquence, c'est-à-dire le véhicule qui demande l'accélération la plus faible. Nous définissons sa distance correspondante s_{vs} par :

$$s_{vs} = (x_l^{zlc} - x'_l + l_l + s^{zlc}) - (x_f^{zlc} - x_f) \quad (4.2)$$

Avec l_l la longueur du véhicule leader, x_l^{zlc} la position de la ZLC pour le véhicule leader, x_f^{zlc} la position de la ZLC pour le véhicule suiveur et s^{zlc} la taille de la zone locale de conflit (voir Figure 4.4). L'ajout de cette taille permet d'assurer la sécurité des véhicules. En effet si la distance s_{vs} est positive on assure que le véhicule suiveur ne peut pas traverser avant le véhicule leader, mais également que le pare-chocs avant du véhicule suiveur ne peut pas entrer dans la ZLC tant que le pare-chocs arrière du véhicule leader n'a pas quitté totalement cette dernière.

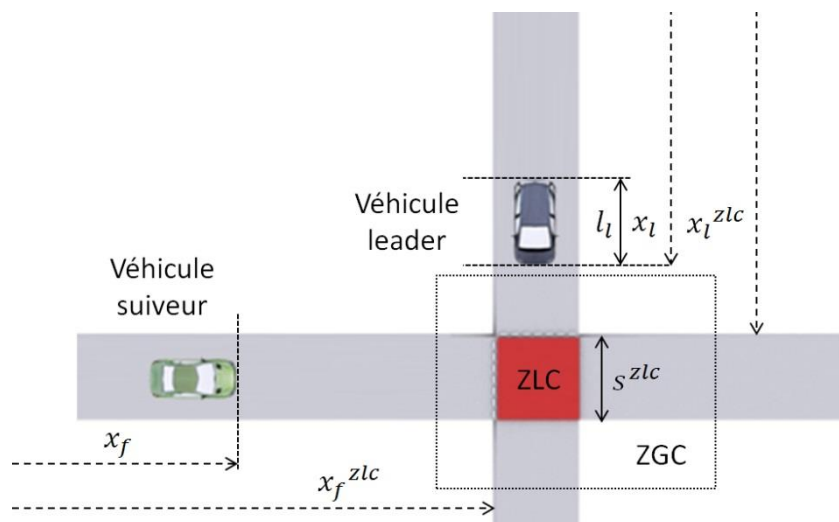


Figure 4.4 - Principe du croisement dans le protocole MIT

Le calcul de l'accélération a_{pv} est basé sur l'entrée d'une zone locale de conflit. Cette ZLC est choisie à travers la liste des OVS. En effet, à chaque véhicule qui précède dans une voie conflictuelle est associée une ZLC. Par sécurité, le calcul utilise donc la première ZLC rencontrée. Nous soulignons le fait qu'une ZLC est ignorée si aucun OVS ne correspond à celle-ci. De plus, dans le cas où le véhicule ne reçoit pas la séquence de passage, l'accélération a_{pv} se base sur la fin de la zone de stockage (début de la ZGC).

L'accélération qui résulte des OVS et des OVP nous donne :

$$a_v = \begin{cases} a_{vp} & \text{si } s_{vs} - s_0 < 0 \text{ ou } a_{vs} < b_f \\ a_{vs} & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.3)$$

L'égalité (4.3) signifie que si le "pire" OVS se trouve plus proche de la ZLC que le véhicule suiveur, ou qu'il demande un freinage trop important par rapport au freinage désiré, alors le véhicule suiveur adapte sa vitesse en vue d'un arrêt à l'entrée de la zone de conflit.

Enfin, l'accélération finale est calculée à partir des obstacles virtuels et des obstacles réels de cette manière :

$$a = \min(a_r, a_v) \quad (4.4)$$

Ainsi pour des raisons de sécurité, un véhicule se base toujours sur le "pire" obstacle, soit réel, soit virtuel.

4.1.4 Tests réels

Nous avons effectué des tests réels grâce à une intersection de mini-robots NXT (voir Figure 4.5). Les zones de l'intersection sont délimitées grâce à des bandes de couleur qui sont détectées par le capteur couleur de chaque robot. Le serveur d'intersection est une brique NXT capable de communiquer avec les robots de manière à distribuer le droit de passage. Le protocole MIT ainsi que la stratégie de régulation décrite précédemment ont été implémentés dans les briques. Pour ce premier test du protocole la méthode d'adaptation de la vitesse utilisée est simplifiée, ainsi la puissance des moteurs correspondante à un obstacle est calculée en fonction de la distance de l'obstacle (virtuel ou réel) de la manière suivante :

$$\%(t + T_s) = \max(\min(50, d(t) - D), 0) \quad (4.5)$$

Avec $\%(t + T_s)$ la puissance des moteurs en pourcentage de leur capacité maximale au temps $t + T_s$. T_s désignant le temps de réaction du système. De plus $d(t)$ est la distance en centimètres renvoyée par le capteur ultrason ou la distance d'un obstacle virtuel. D représente la distance que le véhicule ne doit pas dépasser, celle-ci est fixée à 15 centimètres pour ce test.

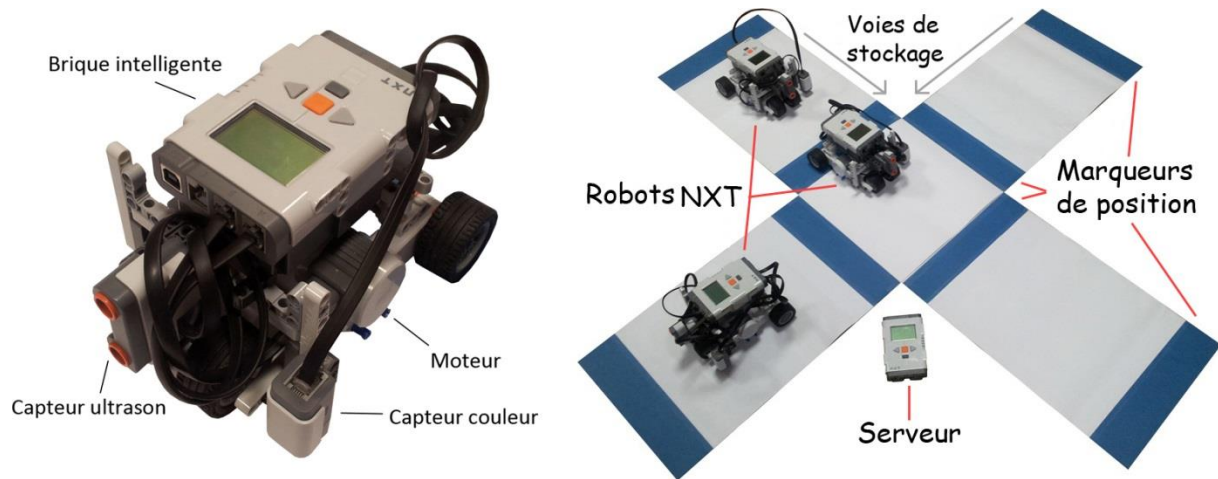


Figure 4.5 – Intersection de mini-robots NXT

Après de nombreux croisements des robots dans l'intersection, nous n'avons constaté aucune collision. De plus, les robots provenant de voies conflictuelles se croisent sans collision.

Des tests complémentaires du protocole SVAC ont été réalisés de manière à comparer les résultats avec le protocole MIT. Grâce aux vidéos des tests, les temps inter-véhiculaires et les temps de croisement ont été mesurés. Les moyennes des temps observés sont données dans la Figure 4.6.

On note le fait que dans les protocoles testés le temps inter-véhiculaire est inférieur au temps de croisement, ce qui s'explique principalement par les délais de communication et les précautions de sécurité décrites précédemment. De plus on remarque le net avantage du protocole MIT sur le temps de croisement avec un gain d'environ deux secondes.

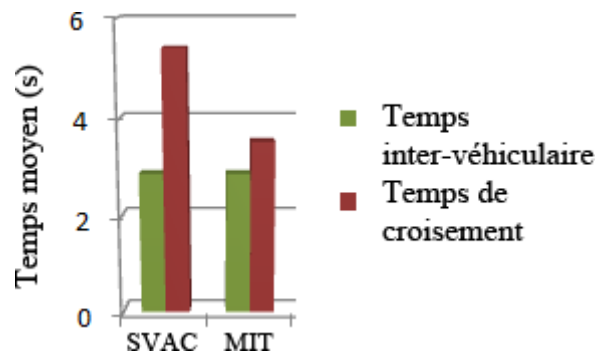


Figure 4.6 - Comparaison des temps entre deux véhicules dans SVAC et MIT

Les tests effectués montrent la faisabilité du protocole, ainsi que la possibilité d'améliorer le croisement des véhicules, notamment à travers la commande de vitesse. Cependant les robots sont capables d'atteindre leur vitesse maximale et de s'arrêter quasiment instantanément. L'application sur des véhicules autonomes à échelle humaine nécessite donc un travail supplémentaire. La suite du chapitre traite de manière spécifique la définition de la commande de vitesse.

4.2 Adaptation du modèle de suivi de véhicule IDM

Dans le domaine de la régulation adaptative des vitesses, les approches de commande sont basées sur le temps inter-véhiculaire T . La stabilité du système dépend du temps de réaction. Historiquement, les fonctions de suivi simulent le comportement humain. Par ce fait, la borne maximale de temps de réaction est généralement voisine de 1s. Les nouvelles fonctions de suivi ont pour objectif d'éviter les obstacles sur des véhicules réels. Elles visent à maintenir un temps inter-véhiculaire constant, tout en prenant en considération les paramètres physiques du véhicule et des capteurs utilisés. Dans le cas du MIT, les véhicules sont différents et auront besoin d'une fonction commune limitant leur accélération. Nous avons choisi IDM (Intelligent Driver Model) [144] car cette fonction a été développée indépendamment des véhicules et a été par la suite généralisée pour être utilisée dans le cadre de la régulation adaptative de la vitesse [145]. Dans la suite nous l'adapterons au contexte de MIT pour des fins de comparaison. En effet, IDM est instable pour un temps de réaction supérieur à 0,9 s.

Dans les tests réels précédemment réalisés, les véhicules ne tenaient compte que de la distance de l'obstacle. Nous souhaitons maintenant prendre en compte également la vitesse de l'obstacle. Comme il a été cité précédemment, le modèle IDM est initialement conçu pour représenter le comportement d'un conducteur humain lors du suivi d'un véhicule. Nous souhaitons ici utiliser ce modèle dans le cas du véhicule autonome pour effectuer un suivi classique, mais également pour le croisement en l'assimilant à un suivi de véhicule. Nous proposons ensuite une extension du modèle IDM de manière à optimiser la vitesse des véhicules à l'entrée de la zone de conflit.

4.2.1 IDM

Le modèle IDM propose une fonction continue qui permet à un véhicule d'adapter sa vitesse par rapport à un véhicule qui précède ou un obstacle fixe. Le principe du calcul est basé principalement sur la définition d'un paramètre de sécurité $T = 2$ s qui représente le temps inter-véhiculaire désiré entre le véhicule suiveur et le véhicule qui précède (voir Tableau 4.2). La méthode utilise un paramètre δ généralement fixé à 4 et servant à affiner l'accélération du véhicule en fonction de sa vitesse par rapport à la vitesse maximale désirée.

Paramètre	Signification	Valeur
δ	Exposant d'accélération	4
T	Temps inter-véhiculaire désiré	2 s

Tableau 4.2- Paramètres du modèle IDM

On rappelle que x_f, v_f, a_f représentent respectivement la position, la vitesse et l'accélération du véhicule suiveur (voir Tableau 4.1). Le véhicule leader est représenté de la même manière par x_l, v_l et a_l . L'accélération du véhicule suiveur est définie par :

$$a_f = a \left[1 - \left(\frac{v_f}{v_{max}} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (4.6)$$

Avec

$$s^* = s_0 + v_f T + \frac{v_f \Delta v^*}{2\sqrt{a^* (-b_f)}} \quad (4.7)$$

Le paramètre s dépend du type d'obstacle, ainsi il est défini par:

$$s = \begin{cases} s_r & \text{si l'obstacle est réel} \\ s_{vp} & \text{si l'obstacle est le début d'une zone de conflit} \\ s_{vs} & \text{si l'obstacle est un véhicule de la séquence de passage} \end{cases} \quad (4.8)$$

Le paramètre Δv^* dépend également du type d'obstacle, il est donné par:

$$\Delta v^* = \begin{cases} \Delta v & \text{si l'obstacle est réel} \\ v_f & \text{si l'obstacle est le début d'une zone de conflit} \\ \Delta v' & \text{si l'obstacle est un véhicule de la séquence de passage} \end{cases} \quad (4.9)$$

Avec $\Delta v = v_f - v_l$ et $\Delta v' = v_f - v'_l$.

4.2.2 Extension d'IDM (CIDM)

On a pu voir qu'il est possible d'utiliser le modèle IDM pour n'importe quel obstacle (réel ou virtuel) à condition d'utiliser les bons paramètres. Cependant, le modèle initial considère que le véhicule suiveur se trouve toujours derrière le véhicule leader. Or dans le cas d'un véhicule se trouvant dans une voie conflictuelle, l'obstacle est virtuel, il ne devient réel que pendant son passage dans la zone de conflit. Nous souhaitons donc utiliser le temps pendant lequel le véhicule est virtuel pour optimiser sa vitesse, dans le but d'atteindre la zone de conflit dans de meilleures conditions. En effet, moins le véhicule passe de temps dans la zone de conflit, moins il retarde le passage des autres véhicules.

Nous proposons une simple modification des paramètres. Au lieu de considérer une distance par rapport au véhicule virtuel, il est possible d'utiliser directement la distance restante avant la zone de conflit. En effet il n'existe pas de risque de collision avant la zone de conflit dans le cas d'un croisement. De plus, le véhicule adapte sa vitesse pour respecter un temps inter-véhiculaire T .

On définit un nouveau modèle IDM de type coopératif (CIDM) comme ceci :

$$a_f = a \left[1 - \left(\frac{v_f}{v_{max}} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s_{vp}} \right)^2 \right] \quad (4.10)$$

Avec

$$s^* = s_0 + v_f (t_{el} + T) + \frac{v_f \Delta v'}{2\sqrt{a^* (-b_f)}} \quad (4.11)$$

Où t_{el} représente le temps estimé pour que le véhicule leader ait quitté totalement la ZLC, il est donné par:

$$t_{el} = \left(\frac{s_l}{v'_l} \right) \text{ pour } v'_l > 0 \quad (4.12)$$

Avec s_l la distance nécessaire pour que le pare-chocs arrière du véhicule leader ait dépassé la ZLC.

4.2.3 Simulations

Nous effectuons une série de simulations avec plusieurs objectifs principaux :

1. Tester la sécurité du protocole MIT,
2. Tester le comportement de la politique CIDM,
3. Tester l'influence des délais de communication
4. Tester l'influence de la composition de la séquence

L'adaptation de la vitesse par rapport aux obstacles réels (OR) et aux obstacles virtuels préprogrammés (OVP) est toujours basée sur la méthode IDM. En revanche pour adapter sa vitesse par rapport aux obstacles virtuels de séquence (OVS), un véhicule utilise la méthode CIDM.

4.2.3.1 Politiques

Les simulations sont basées sur la définition de quatre politiques, les feux tricolores et trois versions qui reposent sur le protocole MIT, c'est-à-dire PAPS (Premier Arrivé Premier Servi), PEDDA (Politique d'Evacuation Distribuée pour véhicules Autonomes) et PEDH (Politique d'Evacuation Distribuée pour conducteurs Humains).

1. Feux tricolores :

Dans le cas des feux tricolores, on applique une simple régulation à deux phases avec un temps de cycle fixe. Les temps des phases et du cycle sont adaptés au débit moyen du trafic.

2. MIT (PAPS) :

Dans la politique PAPS (Premier Arrivé Premier Servi), la séquence est construite en fonction de l'ordre de réception des requêtes d'entrée des véhicules. C'est-à-dire que dès que le serveur d'intersection reçoit une requête d'un nouveau véhicule, celui-ci est ajouté tout de suite à la fin de la séquence de passage.

3. MIT (PEDDA) :

La PEDDA (Politique d'Evacuation Distribuée pour véhicules Autonomes) reprend le principe de la PED, initialement conçue pour le protocole SVAC. Nous rappelons que la PED permet de composer des convois de véhicules grâce à l'observation des temps inter-véhiculaires. Cette méthode est parfaitement adaptée au problème des conducteurs humains puisque ceux-ci n'ont pas le droit d'obtenir le droit de passage s'ils sont en conflit avec d'autres véhicules autorisés. Cependant, dans le cas des véhicules autonomes qui obtiennent le droit de passage alors qu'ils sont en conflit, l'ajout de véhicules à la fin d'un convoi retarde l'ajout dans la séquence des voies en conflit. Pour résoudre le problème on définit un critère de temps t_γ . Ainsi dès que le temps écoulé depuis le dernier ajout à la séquence de passage dépasse le paramètre t_γ , le serveur peut ajouter les véhicules des voies conflictuelles. En d'autres termes

si les véhicules d'une même voie arrivent dans un laps de temps assez court ils sont ajoutés au convoi, sinon ils devront passer après des véhicules en conflit.

4. MIT (PEDH) :

Dans la PEDH (Politique d'Evacuation Distribuée pour conducteurs Humains) on souhaite reproduire une limite du conducteur humain. En effet, par sécurité nous considérons qu'un conducteur humain n'est pas capable d'adapter correctement sa vitesse pour respecter un ordre de passage. Le but est de pouvoir comparer l'avantage du véhicule entièrement autonome par rapport à un véhicule autonome bridé par une limite humaine. Le serveur d'intersection a donc interdiction d'utiliser le principe de l'OVS, c'est-à-dire qu'il n'ajoute un véhicule à la séquence que si celui-ci n'est pas en conflit avec un véhicule déjà autorisé. Ainsi dans cette politique la création d'un convoi s'arrête dès que le dernier véhicule de la voie est trop loin.

4.2.3.2 Paramètres

Comme pour les autres simulations de la thèse, une séquence de génération des véhicules est calculée au préalable. Ainsi une comparaison peut être effectuée à partir de la même séquence entre différentes politiques. Une nouvelle séquence est générée pour chaque comparaison, puis la moyenne des résultats est présentée sous forme de courbes.

Nous choisissons de générer une séquence de 80 véhicules pendant un laps de temps de 188 secondes. De plus, le débit généré varie au cours du temps de manière à représenter un pic de trafic en milieu de simulation. Ainsi, le débit est de 1000 véhicules par heure (v/h) pendant 100 secondes, puis 2800 v/h pendant 50 secondes, et pour finir 1200 v/h jusqu'à la fin de la séquence.

On souhaite également étudier les différentes politiques à travers les délais de communication. Un temps moyen de communication est donc introduit dans la simulation pour retarder volontairement la transmission des informations entre les véhicules et le serveur d'intersection. C'est-à-dire que le paramètre t_m représente le temps moyen nécessaire pour transmettre un message valide. Nous soulignons le fait que le temps nécessaire pour transmettre la position d'un véhicule vers un autre véhicule prend donc environ $2t_m$ puisque l'information doit d'abord passer par le serveur d'intersection. Nous choisissons de fixer ce temps à différents seuils : ~ 0 s, 0.5 s, 1 s et 2 s.

De plus on définit un temps de réaction moyen de 200 ms pour les véhicules et de 500 ms pour le serveur d'intersection. Le but est d'ajouter une perte de temps supplémentaire aux niveaux des systèmes, tout en créant une désynchronisation des horloges.

4.2.3.3 Résultats

Les courbes des résultats sont présentées sous forme de quatre graphiques avec pour chacun un temps moyen de communication différent t_m allant de ~ 0 s à 2 s (voir Figure 4.7).

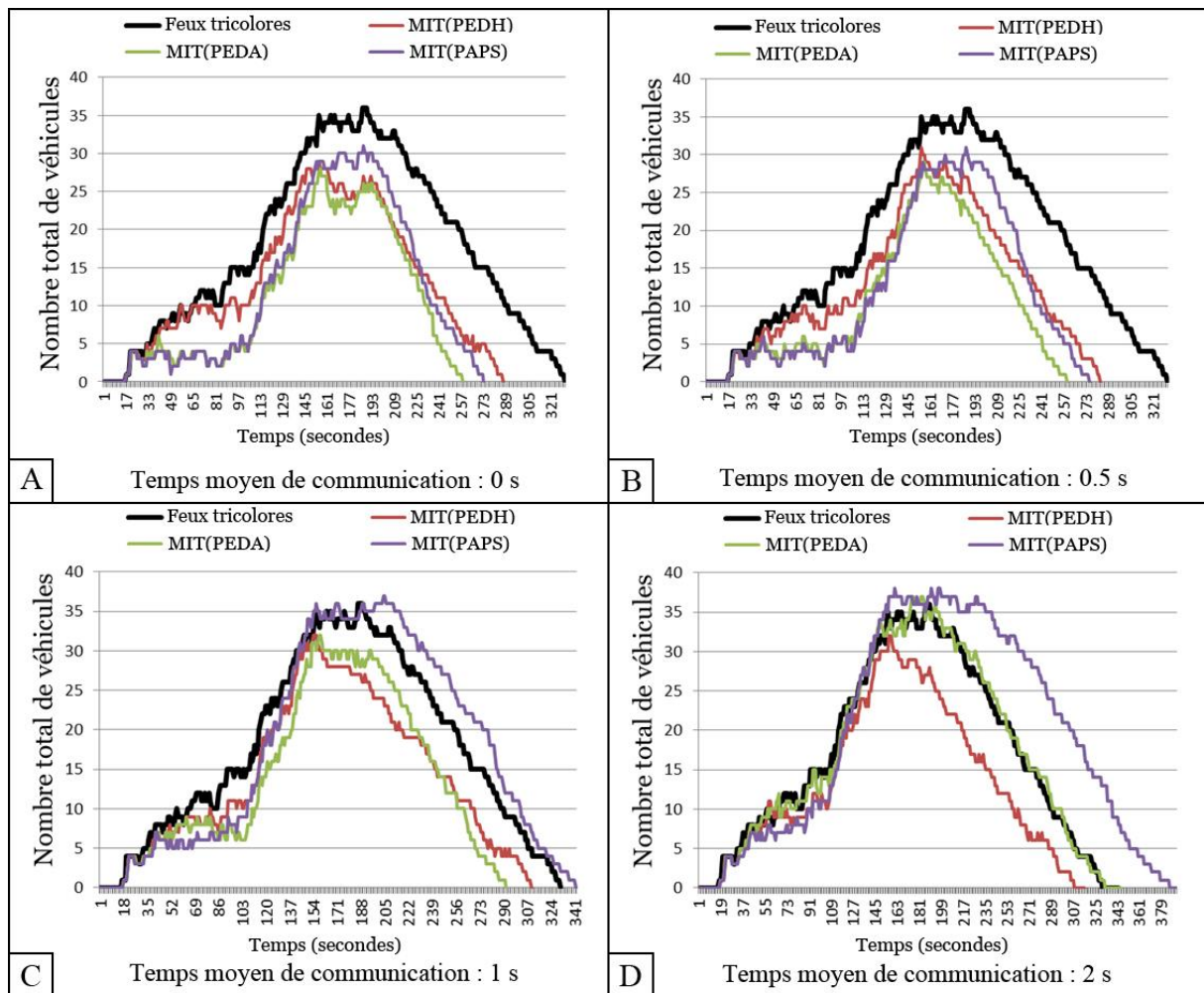


Figure 4.7 – Comparaison des méthodes MIT avec un temps de communication variable

Les deux premiers graphiques nous permettent de tirer des observations comparables (voir Figure 4.7 (A et B)):

- Toutes les méthodes basées sur le protocole MIT donnent des résultats relativement similaires et surpassent la méthode des feux tricolores,
- Au début de la simulation, on remarque que la politique MIT(PEDH) est moins efficace que les autres politiques du protocole MIT, c'est-à-dire pour un faible trafic,
- Lorsque le pic de trafic est atteint, la méthode MIT(PAPS) présente des difficultés à évacuer les véhicules contrairement aux autres politiques MIT, et malgré l'avance prise sur l'évacuation des premiers véhicules,
- En termes de temps d'évacuation total, la méthode MIT(PEDA) présente un gain de quelques secondes en fin de simulation par rapport aux méthodes PEDH et PAPS.

Pour un délai de communication moyen d'une seconde, nous constatons un net changement sur l'efficacité des politiques (voir Figure 4.7 (C)) :

- La méthode MIT(PAPS) se comporte bien en début de simulation, mais devient ensuite pire que la méthode des feux tricolores,

- Les méthodes MIT(PEDH) et MIT(PEDA) montrent des résultats similaires, mais légèrement moins bons que pour des délais de communication plus faibles,
- On remarque également que la PEDA est légèrement meilleure que la PEDH pour un faible trafic, puis devient moins bon pour un fort trafic, pour finalement repasser devant pour évacuer les derniers véhicules.

Pour des délais moyens de communication de 2 secondes les résultats obtenus sont très significatifs (voir Figure 4.7 (D)) :

- Toutes les politiques de régulation semblent quasiment équivalentes jusqu'à environ 160 secondes de simulation, puis d'importantes différences se créent,
- La méthode MIT(PAPS) présente de très mauvais résultats, même par rapport aux feux tricolores,
- La méthode MIT(PEDA) est équivalente à la méthode des feux tricolores jusqu'à la fin de la simulation,
- La méthode MIT(PEDH) évacue les véhicules avant les feux tricolores, tout en donnant quasiment le même résultat que pour un délai d'une seconde (voir Figure 4.7 (C)).

4.2.4 Discussion

Nous soulignons le fait qu'aucune collision n'a été observée pendant les simulations. De plus, les simulations montrent que l'efficacité espérée grâce à l'utilisation des véhicules autonomes dépend très largement des conditions de la communication sans-fil et du flux. Dans la littérature, les auteurs obtiennent de très bons résultats avec la politique PAPS. Les tests ont en effet confirmé un fort potentiel pour un faible trafic et pour une très bonne communication sans-fil. Malheureusement, des délais de communication et une augmentation du trafic peuvent rendre la politique PAPS très mauvaise, en aboutissant à un temps d'évacuation largement plus important que pour une régulation classique à base de feux tricolores. Pour des délais de communication inférieurs ou égaux à 500 millisecondes, nous constatons que la méthode PEDA montre un avantage par rapport à la méthode PEDH. En revanche, au-delà de cette limite, la politique PEDA perd son avantage, pour devenir équivalente à l'utilisation des feux tricolores pour des délais importants de 2 secondes. La méthode PEDH montre des résultats intéressants, en effet c'est la seule méthode qui résiste efficacement aux délais de communication.

Grâce aux observations, il est possible de tirer plusieurs conclusions importantes :

- La méthode PAPS tire avantage du faible trafic et d'une bonne communication sans-fil parce que les véhicules peuvent traverser sans interruption la zone de conflit, sans avoir à ralentir. Malheureusement les délais de communication et l'augmentation du nombre de véhicules provoque un ralentissement général des vitesses, ainsi les véhicules passent plus de temps dans la zone de conflit. En effet, les véhicules se basent sur les dernières positions transmises par le serveur, pour des raisons de sécurité. Or si tous les véhicules sont à l'arrêt, du temps est perdu à chaque conflit entre deux véhicules qui doivent traverser,

- La méthode PEDDA possède un comportement proche de la méthode PAPS pour un faible trafic, puisque les véhicules en approche sont ajoutés au fur et à mesure à la séquence. Cependant, la méthode PEDDA prend le dessus sur la méthode PAPS lorsque le trafic devient chargé, en effet le ralentissement des véhicules permet la formation de convois. Malheureusement la méthode PEDDA souffre également des délais de communication pour les mêmes raisons que la méthode PAPS, même si la dégradation est moins importante,
- La méthode PEDH souffre de l'impossibilité d'autoriser des véhicules en conflits pour un faible niveau de trafic, puisque nous considérons des conducteurs humains. Un temps important est donc perdu à chaque fois que le droit de passage change de voie. Cependant, lorsque le trafic augmente, la méthode PEDH profite de la formation de convois pour améliorer son efficacité. Nous constatons en particulier que cette politique souffre très peu des délais de communication. Ce qui s'explique simplement par le fait que le seul temps perdu s'écoule lorsque l'intersection change la voie ayant le droit de passage.

On a pu observer qu'il est intéressant d'appliquer la méthode de croisement CIDM pour réduire la perte de temps des véhicules dans la zone de conflit. Cependant, dès que le trafic augmente, ou que les temps de communication deviennent importants, les véhicules ralentissent et s'arrêtent au niveau de la zone de conflit. De plus, le modèle IDM présente plusieurs problèmes pour le cas étudié ici :

1. Il s'agit d'un modèle continu alors que la régulation d'une intersection est un problème discret. En d'autres termes il ne prend pas en compte les temps de réaction des systèmes.
2. Il se base sur la considération que le véhicule leader n'effectuera pas de freinage d'urgence, donc si c'est le cas le véhicule suiveur se voit forcé d'appliquer également un freinage d'urgence, ce qui est déconseillé dans le cas des véhicules autonomes.
3. Il a pour but de reproduire le comportement d'un conducteur humain, or nous désirons un modèle prévu spécifiquement pour les véhicules autonomes.

On souhaite donc étudier plus en profondeur la commande qui permet à un véhicule d'adapter sa vitesse par rapport aux obstacles réels et virtuels qui soit plus adaptée au véhicule autonome et aux temps de réaction des systèmes.

4.3 Nouvelle méthode de suivi (RAV-TR)

Les deux obstacles qui nous ont parus importants pour la réalisation de MIT sont, le temps de communication et la limite du freinage. Pour le premier, il est nécessaire de permettre au véhicule d'avoir une borne supérieure de temps de réception du message et de pouvoir réagir en fonction. Cette borne doit être capable d'admettre des temps de communication relativement longs. Pour le deuxième obstacle, deux véhicules n'ont pas les mêmes capacités de freinage. En effet, la capacité du freinage dépend de plusieurs paramètres comme le modèle du véhicule, l'état des pneus et le chargement du véhicule. Il est donc nécessaire de considérer une limite de décélération dite de confort.

Face à ces deux obstacles, il est nécessaire de développer une nouvelle méthode de suivi et de prendre en compte les différents problèmes liés aux délais du système. Nous nous intéressons dans cette partie au temps de réaction du système, celui-ci inclut le temps nécessaire à la lecture des capteurs de données, le temps nécessaire à la prise de décision ainsi que le temps nécessaire pour l'application de la nouvelle accélération. Nous appelons la méthode RAV-TR (Régulateur Adaptatif de Vitesse – Temps de Réaction). Elle est basée sur la variable τ qui doit toujours être supérieure au temps de réaction réel du système (le véhicule autonome).

4.3.1 RAV-TR : Principe et équations

La méthode est basée sur l'estimation du mouvement du véhicule leader par rapport au processus de décision du suiveur [146]. Nous considérons d'abord un freinage d'urgence du véhicule leader jusqu'à l'arrêt complet. Le véhicule suiveur tente alors de déterminer une vitesse intermédiaire v_t lui permettant de s'arrêter ensuite avec un freinage confortable. L'intérêt de cette vitesse intermédiaire est de permettre au véhicule suiveur de s'approcher le plus possible de la vitesse du leader sans la dépasser. Ainsi les véhicules d'une intersection devraient synchroniser leur vitesse entre eux.

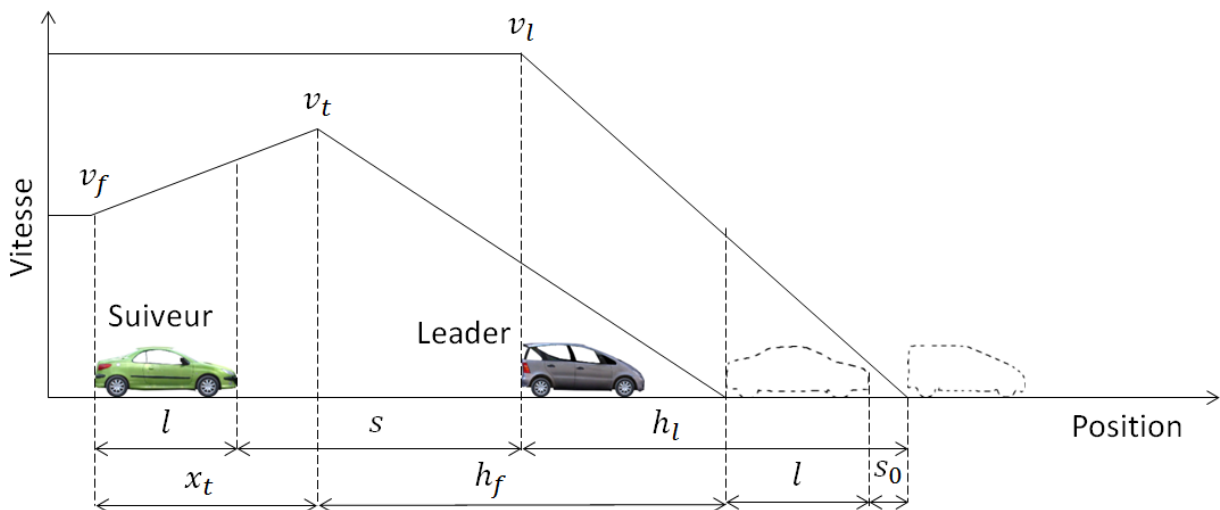


Figure 4.8 - Principe de la fonction de suivi RAV-TR

Par simple déduction le schéma (voir Figure 4.8) nous fournit le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned}
 v_t &= v_f + a_r \tau \\
 x_t &= \frac{\tau}{2} (v_f + v_t) \\
 h_l &= -\frac{v_l^2}{2b_l} \\
 h_f &= -\frac{v_t^2}{2b_f}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

$$h = (l + s + h_l) - (x_t + h_f + l + s_0)$$

Avec v_f et v_l les vitesses actuelles du véhicule suiveur et du véhicule leader, s la distance inter-véhiculaire entre les deux véhicules, l la longueur du véhicule suiveur, s_0 la distance

inter-véhiculaire minimale désirée. h_f et h_l désignent respectivement la distance nécessaire pour que le véhicule suiveur s'arrête et la distance nécessaire pour que le véhicule leader s'arrête. On note également v_t une vitesse intermédiaire désirée par le véhicule suiveur et x_t la distance parcourue pour atteindre cette vitesse.

La résolution du système d'équations (4.13) nous donne :

$$a_f = \frac{b_f \tau - 2v_f - 2b_f \sqrt{\frac{b_f b_l \tau^2 + 4b_l v_f \tau + 4v_l^2 - 8b_l(s - s_0)}{4b_f b_l}}}{2\tau} \quad (4.14)$$

On souhaite maintenant comparer en simulation la nouvelle politique RAV-TR avec les politiques IDM et CIDM.

4.3.2 Simulations

La simulation se limite à dix véhicules. Nous nous intéressons en particulier à deux cas, le cas d'une file de véhicules suivant un leader (aucune intersection), et le cas d'un croisement entre deux files de véhicules. Dans le premier cas chaque véhicule doit suivre son prédécesseur dans la file, sauf le véhicule leader qui peut appliquer n'importe quel comportement dans la limite des capacités physiques d'accélération et de freinage (voir Figure 4.9 (A)). Dans le deuxième cas, on effectue un croisement entre deux files de véhicules (voir Figure 4.9 (B)). Les véhicules traversent l'intersection dans l'ordre indiqué sur la figure, c'est-à-dire que chaque voie laisse passer un véhicule à tour de rôle. Comme pour le cas d'une file de véhicules, le véhicule leader possède n'importe quel comportement. Tous les véhicules sont à l'arrêt en début de simulation et la distance inter-véhiculaire est fixée à 5 m.

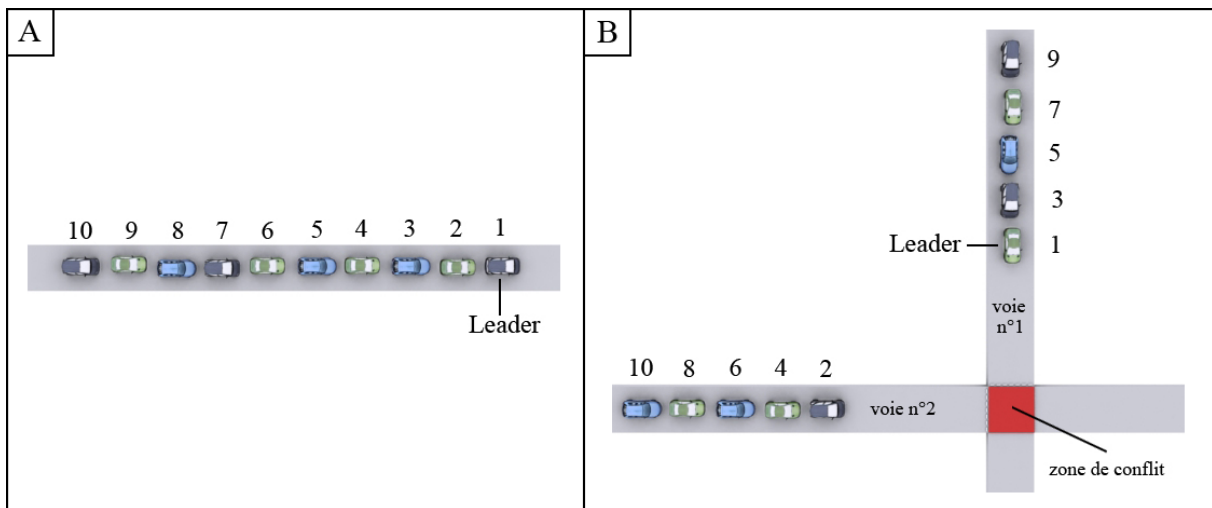


Figure 4.9 - Scénarii pour la comparaison des politiques de suivi de véhicule

Pour chacun des cas présenté précédemment, on souhaite effectuer deux scénarii. Dans le premier scénario le véhicule leader accélère jusqu'à atteindre la vitesse maximale autorisée, puis garde cette vitesse. Dans le deuxième scénario, le véhicule leader accélère pour atteindre la vitesse maximale autorisée, puis effectue un freinage d'urgence à partir d'une distance donnée. Dans le cas d'un croisement de véhicules (voir Figure 4.9 (B)), le véhicule leader doit

s'arrêter de manière à garder une partie du véhicule dans la zone de conflit, pour empêcher tout autre véhicule de traverser l'intersection.

4.3.2.1 Gestion des systèmes

La considération des erreurs provenant des différents systèmes peut causer une instabilité dans les méthodes de suivi de véhicule. C'est pourquoi, pour plus de cohérence des résultats nous définissons des paramètres permettant de simuler des erreurs au niveau de la communication, des systèmes de positionnement des véhicules, ainsi qu'au niveau des radars frontaux. Chaque véhicule possède également un temps de réaction.

Temps de communication

On fixe un temps de communication moyen e_{tc} . Autrement dit c'est le temps moyen de transmission d'une information d'un véhicule vers l'intersection ou de l'intersection vers un véhicule.

Erreur de positionnement

Une erreur aléatoire d'un diamètre maximal e_p est ajoutée à chaque pas de simulation sur les positions des véhicules. Ce qui signifie que les mesures de distance, notamment par rapport aux zones de conflit possèdent également une erreur. De plus les véhicules envoient une position erronée au serveur d'intersection.

Erreur du radar frontal

Le radar frontal de chaque véhicule possède également une imprécision de mesure des distances. Ainsi, un radar ajoute à chaque pas de temps de simulation une erreur de $\pm e_{rf} * d_r$ mètres, avec d_r la distance exacte mesurée et e_{rf} la proportion d'erreur.

Temps de réaction

Le temps de réaction d'un véhicule représente le laps de temps écoulé depuis la dernière prise de décision sur l'adaptation de la vitesse. Nous définissons un temps de réaction aléatoire basé sur probabilité tr_{prob} . De plus le temps de réaction ne peut être inférieur à tr_{min} et ne peut pas être supérieur à tr_{max} . Autrement dit, à chaque pas de temps de simulation un véhicule a une probabilité d'effectuer un calcul de l'accélération dans la limite des bornes données précédemment. Lorsque la différence des deux bornes est différente de zéro, la distribution des temps de réaction s'approche d'une distribution exponentielle (bornée) avec un temps moyen de $tr_{min} + (tr_{max} - tr_{min})/10$.

4.3.2.2 Scénario initial : file de véhicules

Ce scénario considère une file de véhicules suivant un véhicule leader sans aucun croisement (voir Figure 4.9 (A)) avec un freinage d'urgence du véhicule leader. Nous définissons les paramètres suivants $e_{tc} = 0s$, $e_p = 0m$, $e_{rf} = 0$, $tr_{proba} = 2s$, $tr_{min} = 2s$, $tr_{max} = 2s$. Autrement dit nous ne considérons aucune erreur, mais un temps de réaction fixe de deux secondes. Le but de ce test est d'effectuer une première comparaison entre les politiques IDM et RAV-TR dans des conditions simplifiées. De plus, nous choisissons un paramètre $\tau = 2s$

pour la politique RAV-TR de manière à coller parfaitement au temps de réaction et un paramètre $T = 2.5s$ pour représenter le temps inter-véhiculaire désiré de la méthode IDM. Les résultats sont présentés dans Figure 4.10 et Figure 4.11.

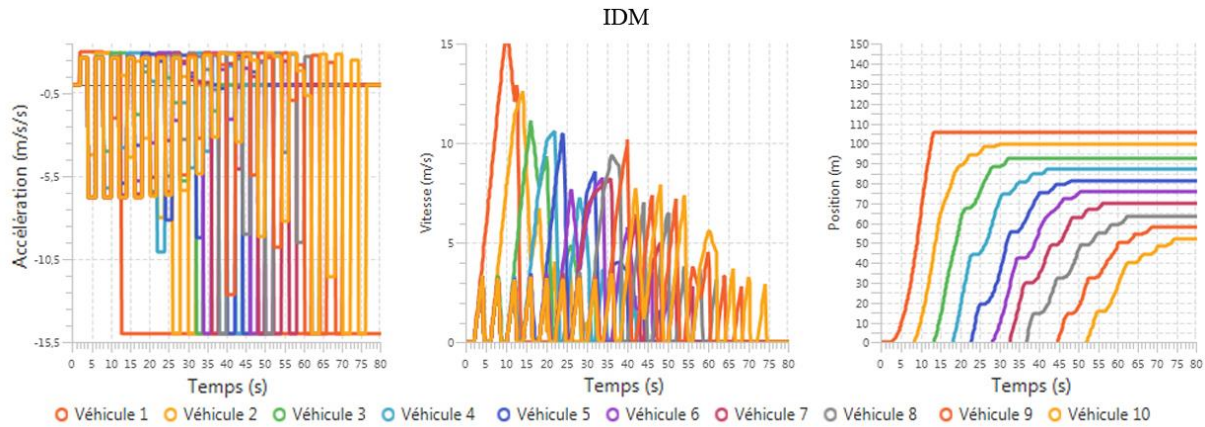


Figure 4.10 - IDM (scénario initial)

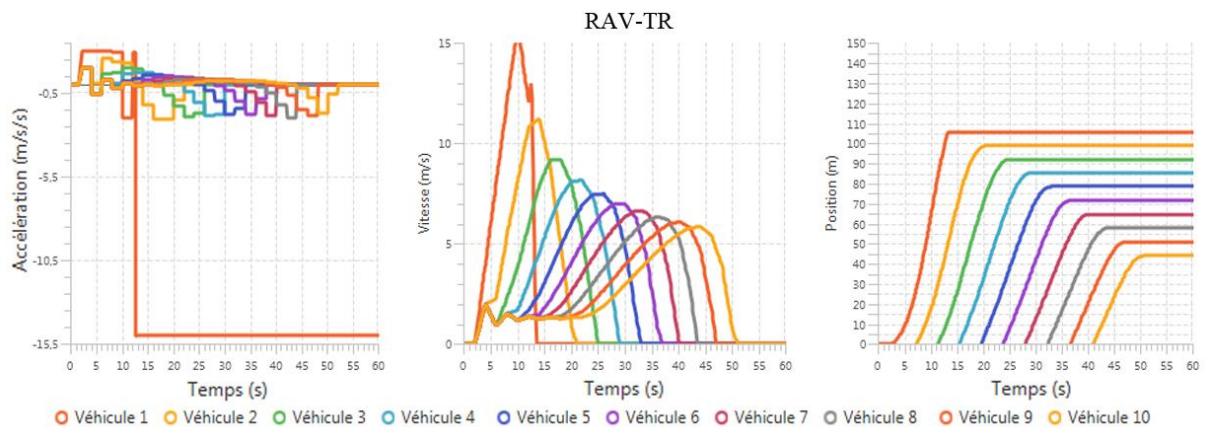


Figure 4.11 - RAV-TR (scénario initial)

Nous observons que la politique IDM est très instable, en effet les véhicules effectuent des freinages d'urgence ($-14m/s^{-2}$) avant d'accélérer de nouveau pour ensuite effectuer encore un freinage et ainsi de suite. On remarque donc que les véhicules sont incapables de prendre en considération le temps de réaction malgré le fait que le temps inter-véhiculaire désiré soit supérieur au temps de réaction. De plus au cours des simulations nous avons constaté plusieurs collisions.

La méthode RAV-TR montre des résultats très intéressants puisqu'une fois que le leader freine, tous les véhicules effectuent un freinage désiré sans à-coups jusqu'à l'arrêt total. Ainsi nous constatons que l'évolution des vitesses est stable. De plus, aucune collision ne se produit et chaque véhicule s'arrête bien à la distance désirée de son prédécesseur.

Il est nécessaire pour la suite d'ajouter les erreurs des systèmes pour évaluer la stabilité des méthodes. Nous allons également prendre en compte un temps de réaction variable.

4.3.2.3 Scénario n°1 : file de véhicules

Ce scénario considère une file de véhicules suivant un véhicule leader sans aucun croisement (voir Figure 4.9 (A)). Le scénario est testé sur les deux méthodes IDM et RAV-TR (voir Figure 4.12 et Figure 4.13). Nous définissons les paramètres $e_{tc} = 0.5s$, $e_p = 2m$, $e_{rf} = 0.1$, $tr_{proba} = 0.2s$, $tr_{min} = 0.2$, $tr_{max} = 1.8$, $\tau = 2s$ et $T = 2s$.

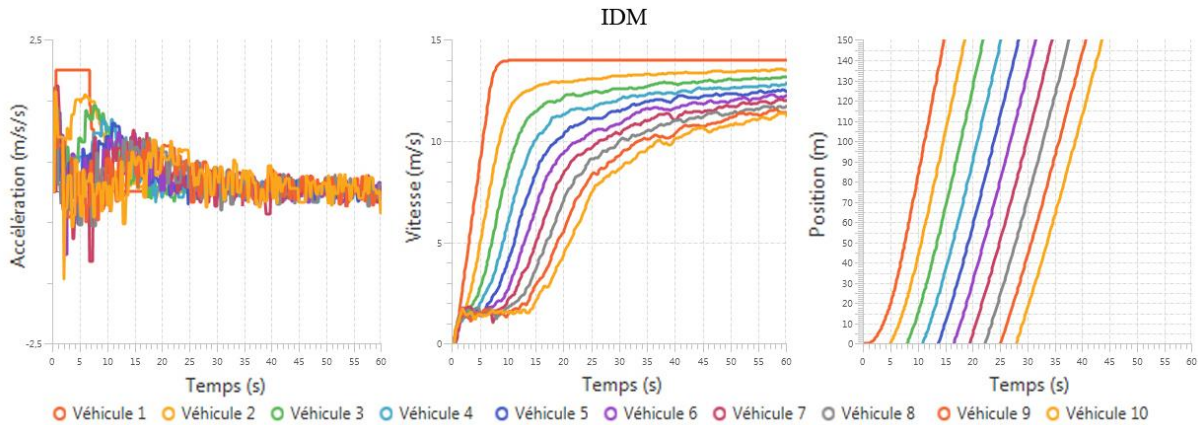


Figure 4.12 - IDM (scénario n°1: file de véhicules)

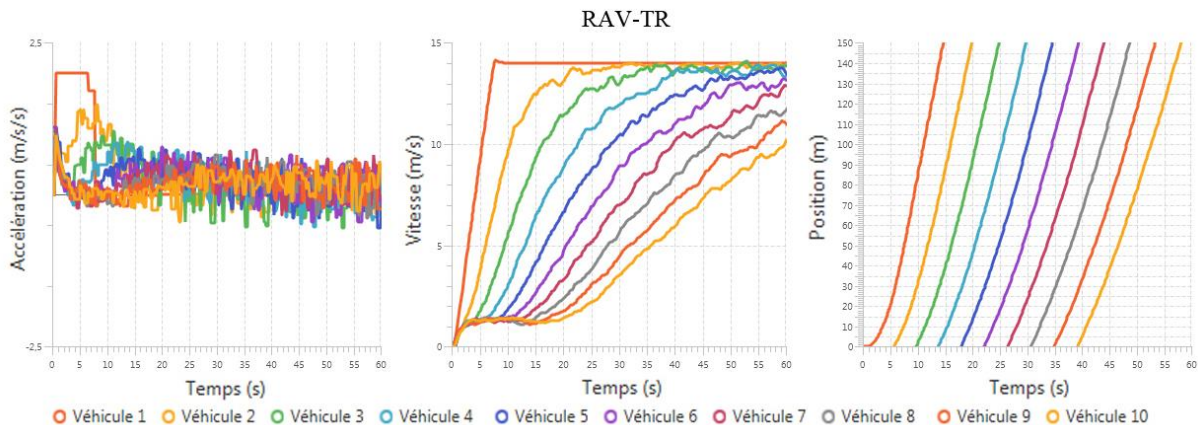


Figure 4.13 – RAV-TR (scénario n°1: file de véhicules)

On note que la méthode IDM est instable en début de simulation avec certaines accélérations jusqu'à $-1.5 m/s^2$, pour ensuite se stabiliser entre $-0.2 m/s^2$ et $0.3 m/s^2$. Pour la méthode RAV-TR en revanche, l'accélération ne descend pas en dessous de $-0.2 m/s^2$ en début de simulation, mais se situe entre $-0.5 m/s^2$ et $0.5 m/s^2$ ensuite.

Pour IDM, le dernier véhicule atteint $150 m$ à $44 s$ tandis que pour RAV-TR, il atteint cette distance au bout de $59s$ de simulation. En effet on remarque clairement que les véhicules prennent des distances de sécurité plus grandes dans la méthode basée sur le temps de réaction. Ces distances s'expliquent par le fait que la méthode RAV-TR se base sur un temps de réaction maximal important de $2s$. De plus elle considère que le véhicule leader peut effectuer un freinage d'urgence tout en assurant que le véhicule suiveur gardera un freinage désiré, tandis que la méthode IDM considère que le véhicule leader ne dépassera pas le

freinage désiré. Or en réalité il est nécessaire de prendre en compte le pire des cas, c'est-à-dire le freinage maximal pour le leader. Nous souhaitons valider cette remarque avec le scénario suivant qui considère le freinage d'urgence du leader.

4.3.2.4 Scénario n°2 : file de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader

Nous considérons une file de véhicules dans laquelle le véhicule leader effectue un freinage maximal dès qu'il a parcouru la distance de 100 m. La situation est testée pour IDM et RAV-TR (voir Figure 4.14 et Figure 4.15). Nous définissons les paramètres $e_{tc} = 0.5s$, $e_p = 2m$, $e_{rf} = 0.1$, $tr_{proba} = 0.2s$, $tr_{min} = 0.2$, $tr_{max} = 1.8$, $\tau = 2s$ et $T = 2s$.

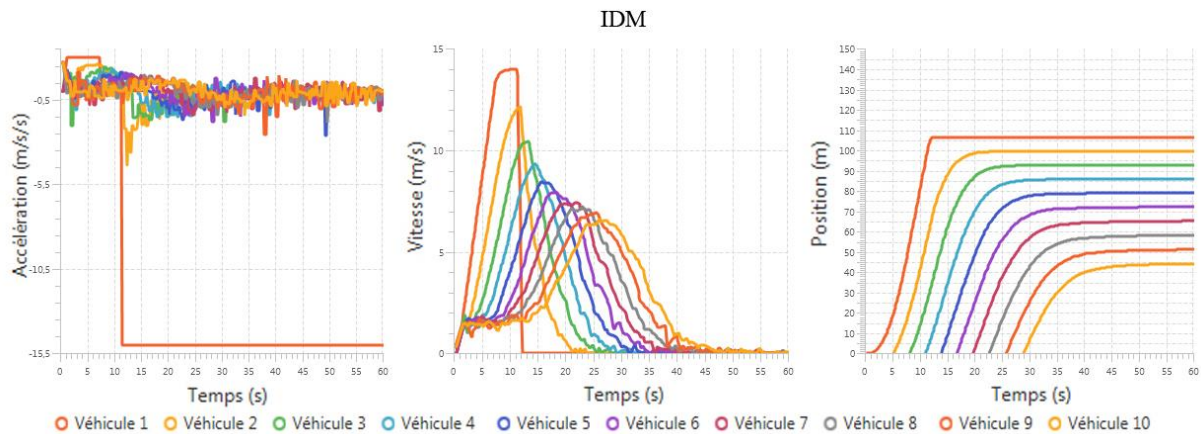


Figure 4.14 - IDM (scénario n°2 : file de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader)

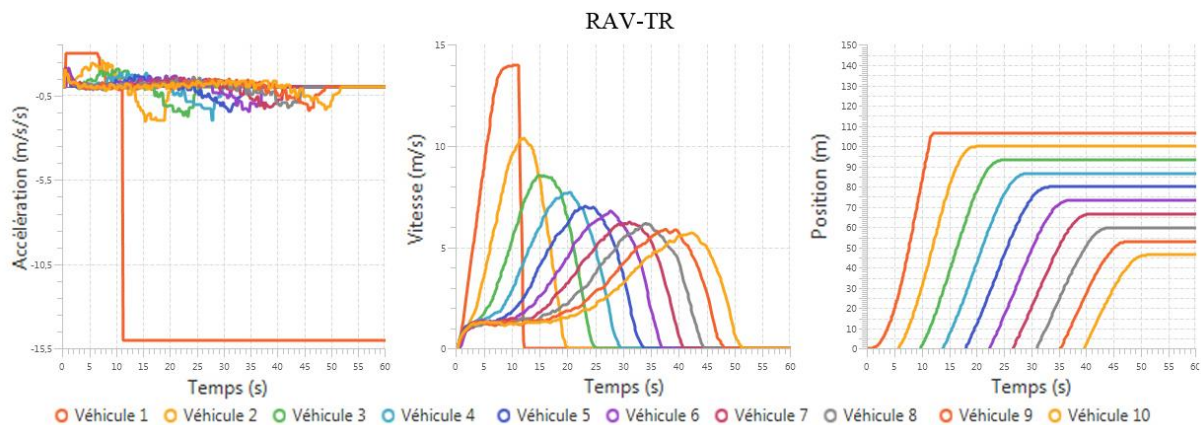


Figure 4.15 – RAV-TR (scénario n°2 : file de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader)

On note clairement que le véhicule n°2 effectue un freinage à $-4.5 m/s^2$ dans le cas d'un suivi de type IDM. Ensuite les autres véhicules proposent des freinages variables mais ne dépassant plus la limite désirée des $-2 m/s^2$. De manière générale, pour IDM, l'accélération est relativement instable lors du freinage. En revanche pour la méthode RAV-TR tous les véhicules se comportent de la même manière en effectuant un freinage assez stable qui ne dépasse pas $-2 m/s^2$. On remarque particulièrement le phénomène d'instabilité sur la vitesse des véhicules utilisant IDM, tandis que les vitesses des véhicules utilisant RAV-TR baissent de manière lissée.

On souhaite maintenant pousser les comparaisons en ajoutant un croisement.

4.3.2.5 Scénario n°3 : croisement de deux files de véhicules

Pour ce scénario, on se base sur un croisement de deux flux de véhicules (voir Figure 4.9 (B)). Les comparaisons sont effectuées à partir de trois méthodes:

- CIDM (voir Figure 4.16) : l'accélération par rapport aux obstacles virtuels est calculée avec CIDM, tandis que les obstacles réels sont traités grâce à IDM,
- IDM (voir Figure 4.17) : l'accélération est toujours calculée avec IDM, quel que soit le type d'obstacle,
- RAV-TR (voir Figure 4.18) : l'accélération est toujours calculée avec RAV-TR, quel que soit le type d'obstacle.

De plus on définit une zone de conflit ayant une taille de 5 m, celle-ci commence à 100 m et se termine à 105 m. Nous définissons les paramètres $e_{tc} = 0.5s$, $e_p = 2m$, $e_{rf} = 0.1$, $tr_{proba} = 0.2s$, $tr_{min} = 0.2$, $tr_{max} = 1.8$, $\tau = 2s$ et $T = 2s$.

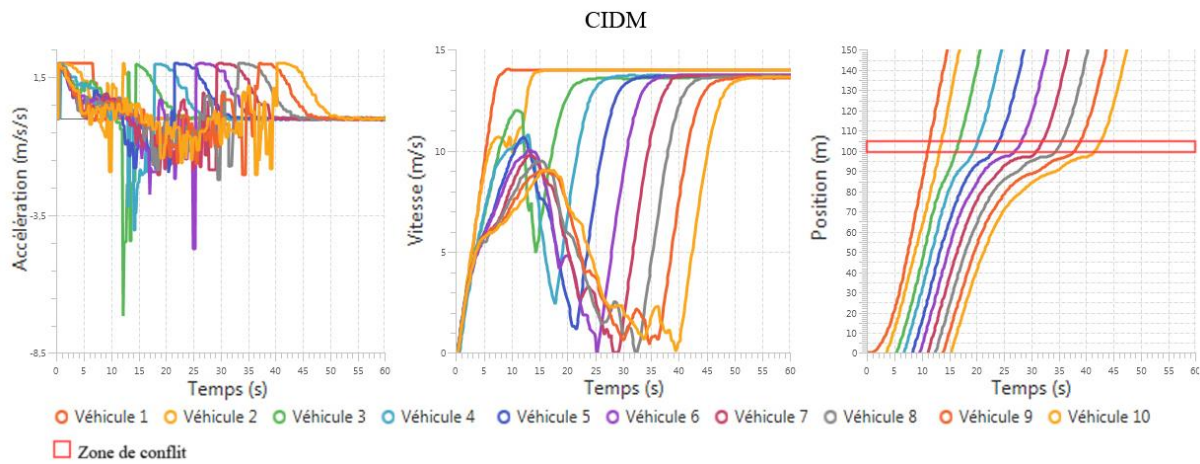


Figure 4.16 - CIDM (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules)

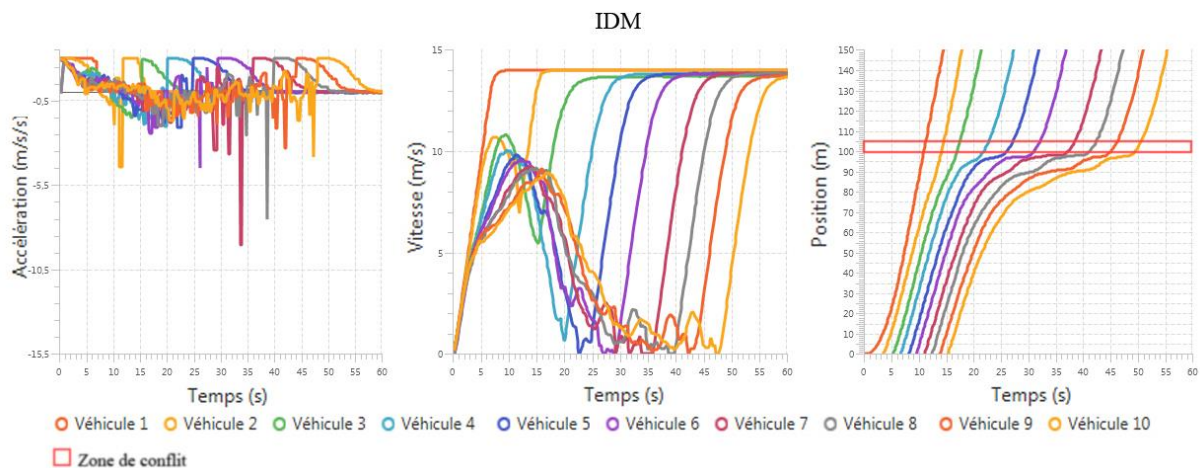


Figure 4.17 - IDM (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules)

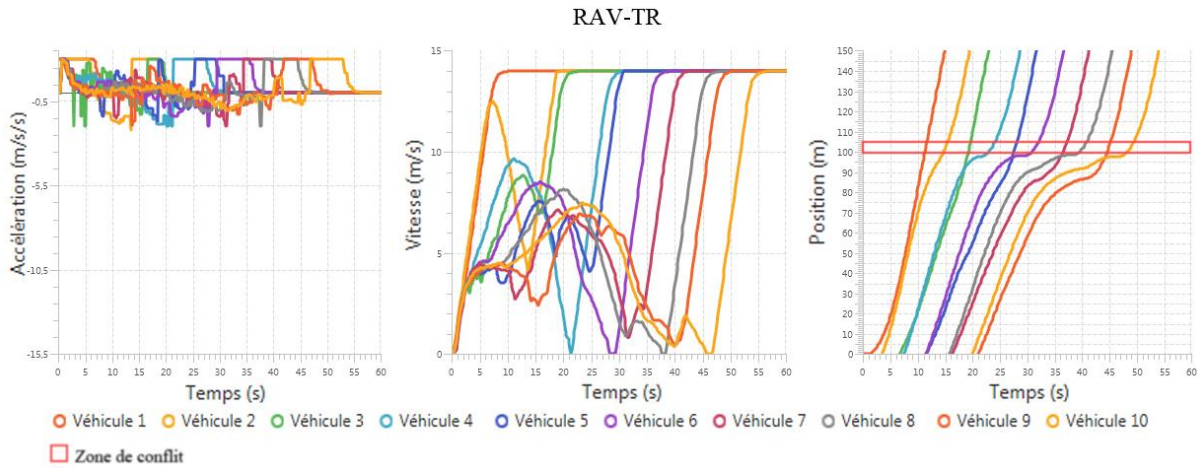


Figure 4.18 - RAV-TR (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules)

On note que les résultats confirment l'avantage de CIDM sur IDM, puisque l'une des méthodes permet l'évacuation au bout de 43 s contre 51 s pour la deuxième. On remarque également qu'IDM propose le même temps d'évacuation que la méthode RAV-TR, contrairement au scénario n°1.

Cependant, si on s'intéresse aux accélérations, on remarque que les méthodes CIDM et IDM ne respectent pas le freinage désiré, avec des décélérations jusqu'à -9 m/s^2 . En revanche la méthode RAV-TR respecte tout le temps le freinage désiré de -2 m/s^2 .

Le respect des limites de freinage est primordial, ainsi les méthodes CIDM et IDM ne doivent pas être utilisées pour le croisement des véhicules, contrairement à RAV-TR qui offre de bons résultats en terme de temps d'évacuation tout en offrant un certain niveau de confort pour les usagers des véhicules autonomes.

4.3.2.6 Scénario n°4 : croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader

Pour ce dernier scénario, on reprend le scénario n°3, mais cette fois, le véhicule leader effectue un freinage maximal dès qu'il atteint la zone de conflit, empêchant ainsi toute traversée de l'intersection. Nous reprenons les trois méthodes CIDM, IDM et RAV-TR (voir Figure 4.19, Figure 4.20 et Figure 4.21). Nous définissons les paramètres $e_{tc} = 0.5s$, $e_p = 2m$, $e_{rf} = 0.1$, $tr_{proba} = 0.2s$, $tr_{min} = 0.2$, $tr_{max} = 1.8$, $\tau = 2s$ et $T = 2s$.

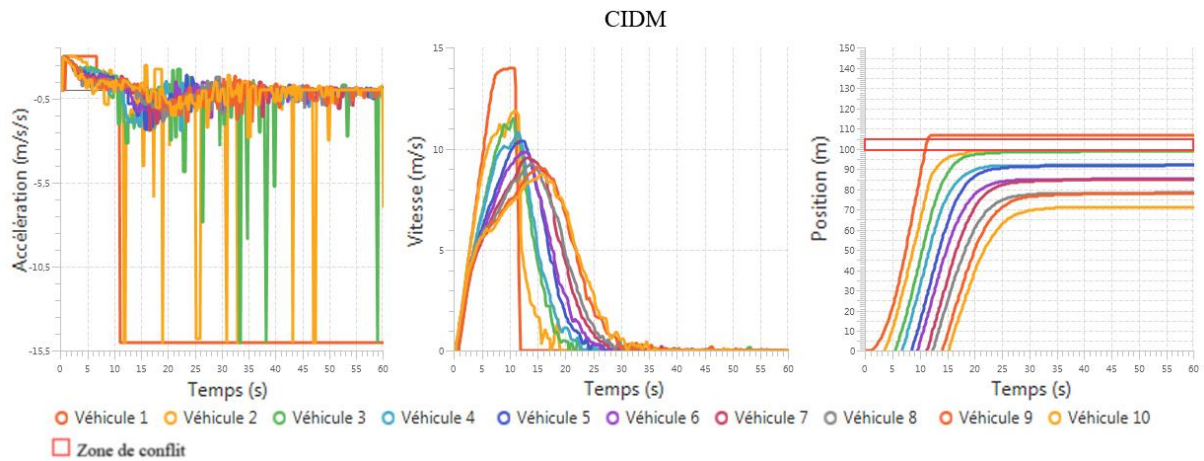


Figure 4.19 - CIDM (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader)

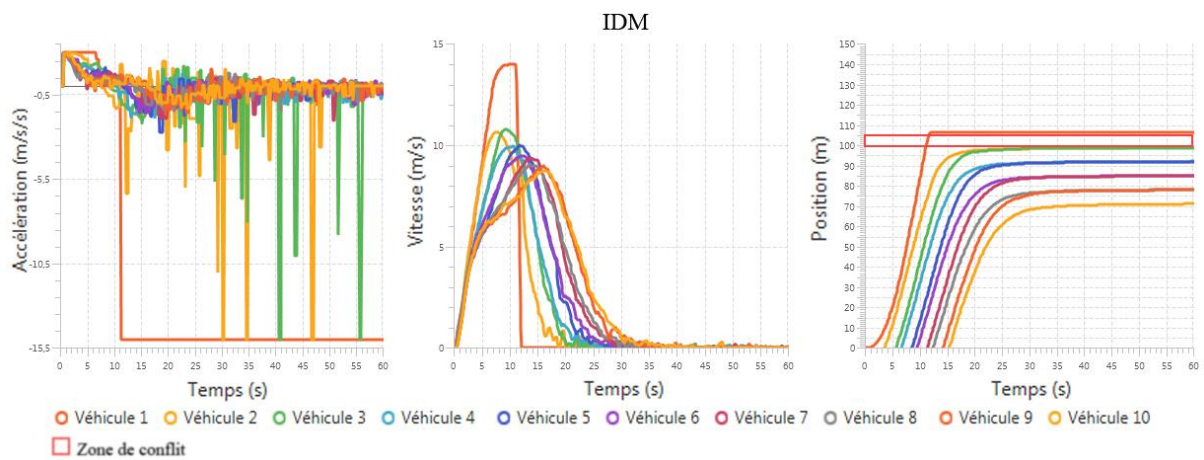


Figure 4.20 - IDM (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader)

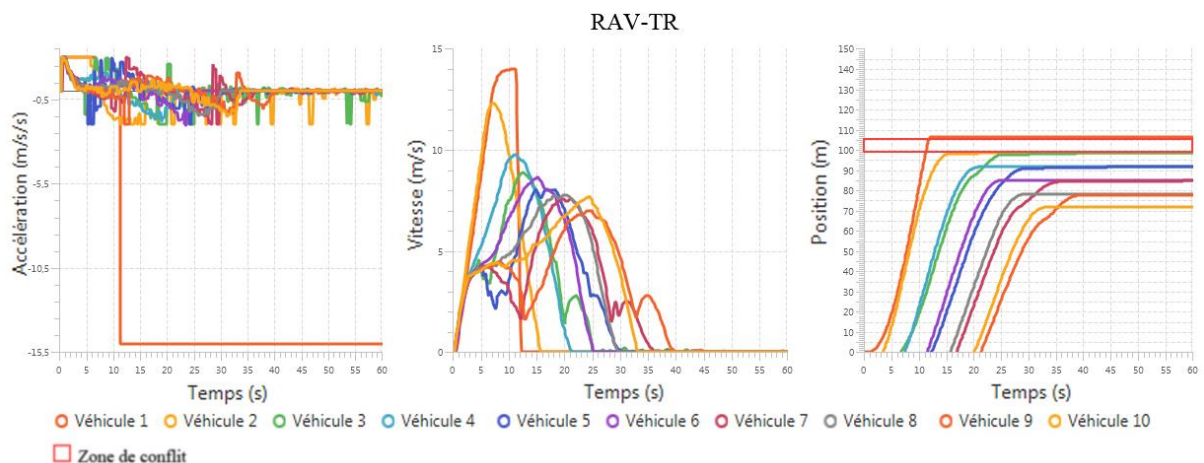


Figure 4.21 - RAV-TR (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader)

Les résultats de cette simulation confirment l'observation précédente, en effet les méthodes CIDM et IDM proposent de nombreux freinages d'urgence qui atteignent la limite physique de freinage fixée (-15 m/s^2). Ces méthodes ne sont donc pas du tout adaptées au cas du croisement. En revanche, la méthode RAV-TR est toujours relativement stable en proposant

des freinages ne dépassant pas le freinage désiré. On note également le fait que les véhicules s'arrêtent bien au niveau de l'entrée de la zone de conflit.

4.3.3 Discussion

La nouvelle méthode de suivi RAV-TR a montré sa robustesse, tout particulièrement en ce qui concerne la sécurité des véhicules. En effet, même si les erreurs introduites dans les simulations ont provoqué une relative instabilité au niveau des variations de l'accélération, nous constatons que les véhicules ne freinent jamais en dessous de la décélération désirée (contrairement à IDM), même dans le cas d'un freinage d'urgence du véhicule leader. Cette dernière observation montre que la prise en compte d'un paramètre τ correspondant à un temps de réaction maximal permet d'obtenir un comportement préventif. On constate également que ce paramètre est directement lié aux performances du suivi et du croisement.

La méthode RAV-TR est basée sur la considération d'un temps de réaction maximal, cependant les simulations ont montré que l'augmentation de la valeur du paramètre permet également de compenser les erreurs de positionnement et de communication. Or une erreur de positionnement se mesure sous forme d'une distance, tandis que la réaction est une mesure temporelle. Il est donc nécessaire d'améliorer la politique de suivi RAV-TR de manière à prendre en compte un ou plusieurs nouveaux paramètres correspondants aux différentes erreurs du système. Cette amélioration devrait ainsi à terme permettre une application directe sur des véhicules autonomes.

Conclusion

Nous avons introduit un nouveau protocole appelé MIT, capable de tirer avantage des capacités des véhicules autonomes tout en assurant la sécurité des véhicules de l'intersection. Le principal avantage du protocole est d'être robuste contre les délais de communication tout en offrant une liberté d'action sur la création de la séquence de passage ainsi que sur la commande de vitesse. Cependant, les erreurs de positionnement et les délais de communication peuvent conduire à une erreur dans l'enregistrement de l'ordre réel des véhicules. Cette question mérite d'être traitée par la suite pour vérifier la possibilité de résoudre le problème de l'interblocage local.

Les résultats des tests réels et des simulations ont montré qu'il est intéressant de faire traverser les véhicules dans l'ordre d'arrivée, à condition que les différents systèmes (communication, positionnement, etc.) proposent une réactivité et une précision suffisante ou que le niveau de trafic soit faible. Dans le cas contraire, il devient plus intéressant de former des convois de véhicules. Cependant il est nécessaire de pousser les recherches pour être capable de proposer une méthode de formation de la séquence de passage qui prend en compte tous les paramètres. Le but est donc de trouver en temps-réel un juste milieu entre le passage dans l'ordre d'arrivée et la formation des convois.

Nous proposons également une nouvelle méthode de suivi de véhicule basée sur l'utilisation d'un paramètre qui représente le temps de réaction maximal. Cette méthode propose de bons résultats, tout particulièrement pour le respect du freinage désiré. Cependant elle doit être améliorée pour prendre en considération les erreurs des systèmes de positionnement, des

systemes de radars, etc. La définition d'une méthode améliorée devrait permettre de commencer des tests à échelle réelle avec des véhicules autonomes.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, nous proposons trois protocoles de régulation coopérative du trafic, associés à des politiques de distribution individuelle du droit de passage. Nous nous intéressons en particulier à deux points, la sécurité (aucune collision) et l'efficacité (augmentation des débits de sortie). Un véhicule doit être équipé au minimum d'un système de communication sans-fil, d'un système de positionnement, d'un système d'affichage interne et dans le cas d'un véhicule autonome d'un régulateur adaptatif de vitesse.

La contribution apportée est traitée sous forme de trois principaux sujets :

1. La régulation d'une intersection isolée, traversée par des conducteurs humains,
2. La régulation d'un réseau d'intersections interconnectées avec pour objectif d'éliminer totalement le risque d'interblocage. Le réseau peut être traversé aussi bien par des conducteurs humains que par des véhicules autonomes,
3. La régulation d'une intersection isolée traversée par des véhicules autonomes. Chaque véhicule est équipé d'un régulateur adaptatif de vitesse.

Nous avons proposé le protocole SVAC (Système du Véhicule Actionneur Coopératif). Celui-ci permet la régulation d'une intersection isolée grâce à la distribution individuelle du droit de passage à travers une communication sans-fil. Le serveur d'intersection est responsable de la création de la séquence de passage qui doit être respectée par les véhicules.

Les premiers tests avec des mini robots ont permis de vérifier la validité du protocole SVAC. Des tests complémentaires ont été réalisés à travers une intersection de véhicules de taille réelle conduits par des volontaires, dont certains découvrant le système pour la première fois. Dans cette expérience, chaque véhicule est équipé d'un affichage interne permettant de montrer au conducteur un symbole rouge ou un symbole vert, de manière à informer celui-ci de l'état du droit de passage. On note le fait que le système de positionnement GPS utilisé est soumis à des erreurs au-delà d'un mètre, la communication sans-fil peut également présenter quelques délais. Nous rappelons que le protocole est conçu pour résister à n'importe quel délai de communication, tandis que la prise en compte de l'erreur du positionnement a été traitée en ajoutant une marge de sécurité à la zone de conflit. Le résultat du test a pu montrer la faisabilité du protocole, ainsi que la possibilité d'améliorer le temps d'évacuation de l'intersection à travers la formation de convois de véhicules. De plus, les utilisateurs ont rapidement montré une confiance dans le système, ce qui témoigne de la possibilité d'un déploiement facile.

Une stratégie de régulation (PED pour Politique d'Evacuation Distribuée) reposant sur le protocole SVAC et basée sur une modélisation par réseau de Petri a été ensuite décrite. Elle permet de composer rapidement et efficacement une séquence de passage des véhicules grâce à un ensemble de règles très simples. La principale règle consiste à autoriser un véhicule se trouvant à une distance temporelle faible d'un véhicule ayant déjà le droit de passage dans la même voie. Le principe est donc de favoriser la formation de convois de véhicules, tout en évitant de changer trop souvent la ou les voies autorisées. La stratégie PED a été comparée en simulation par rapport à la solution optimale, par rapport à une séquence de passage de type

PAPS (Premier Arrivé Premier Servi), et par rapport à une solution de régulation par feux tricolores. En particulier différents niveaux de délais de communication ont été introduits pour vérifier la robustesse de la politique. Les résultats sont convaincants puisqu'ils montrent que la politique permet d'évacuer plus rapidement que les autres testées, tout en offrant une séquence proche de la solution optimale. On a pu également vérifier que le passage des véhicules dans l'ordre d'arrivée (PAPS) n'est pas une solution acceptable pour un débit d'entrée du trafic élevé et pour des délais de communication, ce qui conforte dans l'idée de s'intéresser à la séquence de passage.

La régulation d'une intersection isolée permet de faire abstraction de certains problèmes présents dans la régulation d'un réseau d'intersections (RI). En effet la sortie d'une intersection correspond souvent à l'entrée d'une autre intersection, ce qui provoque souvent un débordement de file, c'est à dire que les véhicules se retrouvent à l'arrêt dans la zone de conflit de la première intersection. Lorsque ce phénomène se propage sur plusieurs intersections, le réseau peut alors être entièrement bloqué de manière définitive (interblocage). Une telle situation ne peut être résolue par des véhicules autonomes, sans avoir à effectuer des manœuvres allant à l'encontre du code de la route (reculer, monter sur un trottoir, etc.).

Nous avons donc proposé un protocole (SVACRI pour Système du Véhicule Actionneur Coopératif Pour les Intersections) qui permet de prévenir l'apparition de l'interblocage grâce à un ensemble de règles simples. En effet, en considérant qu'un trajet est choisi à l'entrée du réseau et ne changera pas, il est possible d'effectuer une réservation de l'espace et du temps permettant d'assurer que le véhicule pourra sortir.

Nous avons réalisé une série de simulations sur un réseau de plusieurs intersections connectées sous forme de grille et mettant en jeu des milliers de véhicules. Aucun interblocage n'a été observé. De plus aucun débordement de file n'est apparu, ce qui permet de ne jamais bloquer un mouvement disponible et donc de ne pas réduire inutilement le débit de sortie.

Nous avons également voulu étudier l'effet du routage des véhicules dans le réseau d'intersections sur le débit de sortie, en utilisant le protocole SVACRI. Ainsi trois méthodes de routage ont été comparées. Chacune se base sur un calcul du chemin le plus court à travers un graphe. Une méthode se base uniquement sur la distance, une sur le niveau de congestion et la dernière sur le niveau de réservation. Des simulations ont pu montrer que détourner un véhicule de son trajet pour éviter une route congestionnée n'est pas nécessairement un bon choix. En effet toute modification entraîne un effet le long du nouveau trajet défini. Nous pouvons conclure que seule l'étude du niveau de réservation peut permettre d'améliorer le débit, en effet c'est la seule méthode qui se base sur l'état future du réseau.

Le type de signalisation du protocole SVAC consiste en un symbole de couleur qui informe le conducteur de l'état du droit de passage. La prise en compte des véhicules autonomes peut être traitée grâce à une représentation différente du droit de passage. Nous avons donc présenté un nouveau protocole (MIT pour Management d'Intersection Transparent) permettant aux véhicules autonomes de profiter de leur capacité d'action sur la commande d'accélération. L'objectif du protocole est d'offrir une synchronisation des vitesses des véhicules. En effet un

embouteillage peut être provoqué par le ralentissement d'un véhicule par rapport aux autres. Un serveur d'intersection génère une séquence de passage qui doit être respectée, mais contrairement au protocole SVAC, deux véhicules en conflit peuvent être autorisés en même temps, l'un devant obligatoirement passer après l'autre en ajustant sa vitesse de manière optimale.

Des tests sur une intersection de mini-robots ont permis de montrer la faisabilité du protocole dans ces conditions. Les vidéos réalisées ont donné la possibilité de mesurer les distances temporelles entre des véhicules d'une même voie et dans le cas du croisement. Pour une intersection de trois robots le protocole MIT présente un avantage par rapport au protocole SVAC malgré des délais de communication importants. Le principe de synchronisation des vitesses semble donc intéressant. Cependant on profite de la capacité à atteindre une vitesse maximale ou à effectuer un arrêt dans un temps quasiment nul. De plus le nombre de robots est trop limité pour conclure.

N'ayant pas le matériel nécessaire pour tester le protocole à échelle réelle, nous reposons la suite des tests sur des simulations mettant en jeu de nombreux véhicules. Nous avons choisi d'utiliser le modèle de suivi IDM (Intelligent Driver Model) et nous avons proposé une extension du modèle (CIDM pour Cooperative IDM) permettant d'optimiser la vitesse d'un véhicule en vue d'un croisement avec un autre véhicule. Plusieurs politiques de régulation ont été comparées, une à base de feux tricolores, et trois autres basées sur le protocole MIT. Différents niveaux de délais de communication ont été introduits.

Les résultats montrent que la synchronisation de la vitesse ne peut totalement dispenser d'une formation de la séquence plus complexe que la méthode PAPS. En particulier plus le débit d'entrée du trafic est fort ou plus les délais de communication sont importants, plus le protocole SVAC devient intéressant par rapport au protocole MIT, tandis que pour un faible débit et pour des délais de communication faibles le protocole MIT propose de meilleurs résultats.

Le modèle IDM a fourni des résultats intéressants, cependant il n'est pas adapté à la prise en compte d'un système possédant un temps de réaction et des erreurs de position ou des délais de communication. Nous avons donc tenté de développer un nouveau modèle de suivi (RAV-TR pour Régulateur Adaptatif de Vitesse – Temps de Réaction) basé sur la considération d'un temps maximal de réaction du système. Le nouveau modèle est au modèle IDM et à son extension CIDM.

Les résultats montrent que la méthode RAV-TR est robuste d'un point de vue de la sécurité. En effet les véhicules ne freinent jamais en dessous du seuil souhaité tout à assurer des distances de sécurité suffisantes, même dans le cas d'un véhicule leader effectuant un freinage d'urgence. On remarque cependant une perte de performance au niveau de l'intersection à cause de la prise en compte de la sécurité par rapport aux méthodes IDM et CIDM. De plus la commande d'accélération présente une relative instabilité à cause des erreurs de positionnement introduites. La méthode RAV-TR doit donc être améliorée pour prendre en compte de manière optimale toutes les erreurs.

Nous envisageons plusieurs perspectives de recherche qui font suite aux travaux présentés :

1. Le protocole SVACRI doit être amélioré pour permettre d'optimiser les trajets des véhicules en fonction de n'importe quel type de réseau. En effet, il est intéressant de déduire des politiques simples de réorientation des véhicules, en fonction de l'état du trafic, pour améliorer les performances globales de l'ensemble du réseau.
2. La politique MIT devra faire l'objet de tests réels basés sur un croisement de véhicules autonomes qui pourront utiliser le système de positionnement RTK, des radars frontaux, des boîtiers de communication ITS ou encore éventuellement des caméras. L'évaluation des systèmes sera nécessaire pour définir une nouvelle commande de la vitesse qui soit robuste.
3. La politique MIT devra également être étendue pour traiter les problèmes de positionnement et de communication pouvant mener à un interblocage local au niveau d'une intersection. En effet dans le cas où l'ordre d'arrivée des véhicules comporte une erreur, il doit être possible de détecter le problème de manière à modifier la séquence de passage sans risque de collision.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Highway Capacity Manual, "Highway capacity manual," *Washington, DC*, 2000.
- [2] Fo Vo Webster, "Traffic signal settings," Tech. rep. 1958.
- [3] Lawrence A Klein, Milton K Mills, and David RP Gibson, "Traffic Detector Handbook: -Volume II," Tech. rep. 2006.
- [4] C Follin and B Inchingolo, "Information sur le trafic routier-Le système SIREDO," *Revue générale des routes (RGRA)*, no. 782, 2000.
- [5] V Kastrinaki, M Zervakis, and Kostas Kalaitzakis, "A survey of video processing techniques for traffic applications," *Image and vision computing*, vol. 21, no. 4, pp. 359-381, 2003.
- [6] T Semertzidis, K Dimitropoulos, A Koutsia, and N Grammalidis, "Video sensor network for real-time traffic monitoring and surveillance," *IET intelligent transport systems*, vol. 4, no. 2, pp. 103-112, 2010.
- [7] Markos Papageorgiou, Christina Diakaki, Vaya Dinopoulou, Apostolos Kotsialos, and Yibing Wang, "Review of road traffic control strategies," *Proceedings of the IEEE*, vol. 91, no. 12, pp. 2043-2067, 2003.
- [8] Simon Cohen, *Ingénierie du trafic routier. Eléments de théorie du trafic et applications.*, 1990.
- [9] FG Tyack, "Street traffic signals, with particular reference to vehicle actuation," *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, vol. 82, no. 494, pp. 125-154, 1938.
- [10] Richard Cowan, "An improved model for signalised intersections with vehicle-actuated control," *Journal of Applied Probability*, pp. 384-396, 1978.
- [11] Dennis I Robertson, "TRANSYT: a traffic network study tool," *Transportation Research Board*, 1969.
- [12] Arthur G Sims and KW Dobinson, "The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 2, pp. 130-137, 1980.
- [13] PB Hunt, DI Robertson, RD Bretherton, and RI Winton, "SCOOT-a traffic responsive method of coordinating signals," Tech. rep. 1981.
- [14] MC Bell, G Scemama, and LJ Ibbetson, "CLAIRE, an expert system for congestion management," in *Drive conference (1991: Brussels, Belgium)*, vol. 1, 1991.

- [15] Nathan H Gartner, Farhad J Pooran, and Christina M Andrews, "Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network," in *Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE*, 2001, pp. 195-200.
- [16] Jean-Jacques Henry, Jean-Loup Farges, and J Tuffal, "The PRODYN real time traffic algorithm," in *IFAC/IFIP/IFORS Conference on control in*, 1984.
- [17] Florence Boillot, Sophie Midenet, and Jean-Claude Pierrel, "The real-time urban traffic control system CRONOS: Algorithm and experiments," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 14, no. 1, pp. 18-38, 2006.
- [18] Suvrajeet Sen and K Larry Head, "Controlled optimization of phases at an intersection," *Transportation science*, vol. 31, no. 1, pp. 5-17, 1997.
- [19] Pitu B Mirchandani and David E Lucas, "RHODES-ITMS Tempe field test project: Implementation and field testing of RHODES, a real-time traffic adaptive control system," Tech. rep. 2001.
- [20] Pitu Mirchandani and Larry Head, "A real-time traffic signal control system: architecture, algorithms, and analysis," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 9, no. 6, pp. 415-432, 2001.
- [21] Vito Mauro and C Di Taranto, "Utopia," *Control, computers, communications in transportation*, 1990.
- [22] Denos C Gazis, *Traffic theory.*: Springer, 2002, vol. 50.
- [23] Christina Diakaki, "Integrated control of traffic flow in corridor networks," Ph. D. Thesis, Technical University of Crete, Department of Production Engineering and Management, Chania, Greece, Ph.D. dissertation 1999.
- [24] Christina Diakaki, Markos Papageorgiou, and Kostas Aboudolas, "A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control," *Control Engineering Practice*, vol. 10, no. 2, pp. 183-195, 2002.
- [25] Abdeljalil Abbas-Turki, Florent Perronnet, Jocelyn Buisson, Abdellah El-Moudni, and Mourad Ahmane, "Cooperative intersections for emerging mobility systems," in *15th meeting of the Euro Working Group on transportation*, 2012.
- [26] Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and Elmar Wasle, *GNSS--global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more.*: Springer, 2007.
- [27] Pratap Misra and Per Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance Second Edition.*: Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2006.

- [28] Richard B Langley, "GLONASS: review and update," *GPS world*, vol. 8, no. 7, pp. 46-51, 1997.
- [29] J Benedicto, S Dinwiddy, G Gatti, R Lucas, and M Lugert, "GALILEO: Satellite system design," *European Space Agency*, 2000.
- [30] J Zhang and G Lachapelle, "Precise estimation of residual tropospheric delays using a regional GPS network for real-time kinematic applications," *Journal of Geodesy*, vol. 75, no. 5-6, pp. 255-266, 2001.
- [31] Dorota A Grejner-Brzezinska et al., "Efficiency and reliability of ambiguity resolution in network-based real-time kinematic GPS," *Journal of Surveying Engineering*, vol. 133, no. 2, pp. 56-65, 2007.
- [32] Rudolph M Kalafus, Peter VW Loomis, K Tysen Mueller, and Leonid Sheynblat, Networked differential GPS system, #jun#~21 1994, US Patent 5,323,322.
- [33] L Gauthier, P Michel, J Ventura-Traveset, and J Benedicto, "EGNOS: the first step in Europe's contribution to the global navigation satellite system," *ESA bulletin*, vol. 105, pp. 35-42, 2001.
- [34] Gabriel Wong, R Eric Phelts, Todd Walter, and Per Enge, "Characterization of signal deformations for GPS and WAAS satellites," in *Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2010)*, Portland, 2010.
- [35] Joshua S Greenfeld, "Matching GPS observations to locations on a digital map," in *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*, 2002.
- [36] Stephen E Reutebuch, Hans-Erik Andersen, and Robert J McGaughey, "Light detection and ranging (LIDAR): an emerging tool for multiple resource inventory," *Journal of Forestry*, vol. 103, no. 6, pp. 286-292, 2005.
- [37] Yimin Zhang, Xin Li, and MG Amin, *Principles and techniques of RFID positioning.*: Wiley, 2010.
- [38] Richard Bloomfield, "Fundamentals of European Rail Traffic Management System-ERTMS," in *11th IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems*, 2006, pp. 165-184.
- [39] Kostia Robert, "Video-based traffic monitoring at day and night vehicle features detection tracking," in *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC'09. 12th International IEEE Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [40] Yehu Shen, Umit Ozguner, Keith Redmill, and Jilin Liu, "A robust video based traffic light detection algorithm for intelligent vehicles," in *Intelligent Vehicles Symposium*,

2009 *IEEE*, 2009, pp. 521-526.

- [41] Alberto Broggi, Claudio Caraffi, Rean Isabella Fedriga, and Paolo Grisleri, "Obstacle detection with stereo vision for off-road vehicle navigation," in *Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2005. CVPR Workshops. IEEE Computer Society Conference on*, 2005, pp. 65-65.
- [42] Gwena, Massimo Bertozzi, St, Abdelaziz Bensrhair, and Alberto Broggi, "Vehicle detection by means of stereo vision-based obstacles features extraction and monocular pattern analysis," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 8, pp. 2364-2375, 2006.
- [43] Dragan Obradovic, Henning Lenz, and Markus Schupfner, "Fusion of sensor data in Siemens car navigation system," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 1, pp. 43-50, 2007.
- [44] Christian Cseh, "Architecture of the dedicated short-range communications (DSRC) protocol," in *Vehicular Technology Conference, 1998. VTC 98. 48th IEEE*, vol. 3, 1998, pp. 2095-2099.
- [45] Jing Zhu and Sumit Roy, "MAC for dedicated short range communications in intelligent transport system," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 41, no. 12, pp. 60-67, 2003.
- [46] Yu Liu, Francois Dion, and Subir Biswas, "Dedicated short-range wireless communications for intelligent transportation system applications: State of the art," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1910, no. 1, pp. 29-37, 2005.
- [47] Fan Bai, Daniel D. Stancil, and Hariharan Krishnan, "Toward Understanding Characteristics of Dedicated Short Range Communications (DSRC) from a Perspective of Vehicular Network Engineers," in *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New York, NY, USA, 2010, pp. 329-340. [Online]. <http://doi.acm.org/10.1145/1859995.1860033>
- [48] Tamer ElBatt, Siddhartha K Goel, Gavin Holland, Hariharan Krishnan, and Jayendra Parikh, "Cooperative collision warning using dedicated short range wireless communications," in *Proceedings of the 3rd international workshop on Vehicular ad hoc networks*, 2006, pp. 1-9.
- [49] Subir Biswas, Raymond Tatchikou, and Francois Dion, "Vehicle-to-vehicle wireless communication protocols for enhancing highway traffic safety," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 44, no. 1, pp. 74-82, 2006.
- [50] Transpod Deputy Director, "RFID for road tolling, road-use pricing and vehicle access control," 1999.

- [51] Jean MESQUI and Francois MALBRUNOT, "Les enjeux du télépéage," *TEC*, vol. 194, pp. 60-67, 2007.
- [52] Daniel Jiang and Luca Delgrossi, "IEEE 802.11 p: Towards an international standard for wireless access in vehicular environments," in *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, 2008, pp. 2036-2040.
- [53] John B Kenney, "Dedicated short-range communications (DSRC) standards in the United States," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1162-1182, 2011.
- [54] Saleh Yousefi, Mahmoud Siadat Mousavi, and Mahmood Fathy, "Vehicular ad hoc networks (VANETs): challenges and perspectives," in *ITS Telecommunications Proceedings, 2006 6th International Conference on*, 2006, pp. 761-766.
- [55] Vivek B Sardeshmukh, "Vehicular Ad Hoc Networks," Indian Institute of Technology, Kharagpur, Ph.D. dissertation 2010.
- [56] Meenakshi Bansal, Rachna Rajput, and Gaurav Gupta, "Mobile ad hoc networking (MANET): Routing protocol performance issues and evaluation considerations," *The Internet Society*, 1999.
- [57] Tracy Camp, Jeff Boleng, and Vanessa Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless communications and mobile computing*, vol. 2, no. 5, pp. 483-502, 2002.
- [58] David Laurenson, Stephen Mclaughlin, and Yow-Yiong Tan, Mobile ad-hoc network, #feb#~10 2006, US Patent App. 11/351,777.
- [59] Mikael Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *Electronics letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145-2146, 1991.
- [60] Maxim Raya and Jean-Pierre Hubaux, "Securing vehicular ad hoc networks," *Journal of Computer Security*, vol. 15, no. 1, pp. 39-68, 2007.
- [61] Meng Lu, Kees Wevers, and Rob Van Der Heijden, "Technical feasibility of advanced driver assistance systems (ADAS) for road traffic safety," *Transportation Planning and Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 167-187, 2005.
- [62] Karel A Brookhuis, Dick De Waard, and Wiel H Janssen, "Behavioural impacts of advanced driver assistance systems--an overview," *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, vol. 1, no. 3, pp. 245-253, 2001.
- [63] Christopher E White, David Bernstein, and Alain L Kornhauser, "Some map matching algorithms for personal navigation assistants," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 8, no. 1, pp. 91-108, 2000.

- [64] William J Chundrlik Jr and Pamela I Labuhn, Adaptive cruise control, #oct#~3 1995, US Patent 5,454,442.
- [65] Ronald K Jurgen, "Adaptive cruise control," SAE Technical Paper, Tech. rep. 2006.
- [66] Priyanka Aggarwal, David Thomas, Lauro Ojeda, and Johann Borenstein, "Map matching and heuristic elimination of gyro drift for personal navigation systems in GPS-denied conditions," *Measurement Science and Technology*, vol. 22, no. 2, p. 025205, 2011. [Online]. <http://stacks.iop.org/0957-0233/22/i=2/a=025205>
- [67] Yu-Kung Chen and Tsun-Ghsien Tsai, "GPS correction with the sky-subimage recognition," in *Digital Information Management (ICDIM), 2012 Seventh International Conference on*, 2012, pp. 365-370.
- [68] Bart Van Arem, Cornelie JG van Driel, and Ruben Visser, "The impact of cooperative adaptive cruise control on traffic-flow characteristics," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 4, pp. 429-436, 2006.
- [69] Gerrit Naus, Ren, Jeroen Ploeg, Ren, and Maarten Steinbuch, "Cooperative adaptive cruise control, design and experiments," in *American Control Conference (ACC), 2010*, 2010, pp. 6145-6150.
- [70] Michele Segata, Falko Dressler, Renato Lo Cigno, and Mario Gerla, "A simulation tool for automated platooning in mixed highway scenarios," in *Proceedings of the 18th annual international conference on Mobile computing and networking*, 2012, pp. 389-392.
- [71] Willem van Willigen, Evert Haasdijk, and Leon Kester, "A multi-objective approach to evolving platooning strategies in intelligent transportation systems," in *Proceeding of the fifteenth annual conference on Genetic and evolutionary computation conference*, 2013, pp. 1397-1404.
- [72] Miguel Angel Sotelo, Francisco Javier Rodriguez, Luis Magdalena, Luis Miguel Bergasa, and Luciano Boquete, "A color vision-based lane tracking system for autonomous driving on unmarked roads," *Autonomous Robots*, vol. 16, no. 1, pp. 95-116, 2004.
- [73] Amirali Jazayeri, Hongyuan Cai, Jiang Yu Zheng, and Mihran Tuceryan, "Vehicle detection and tracking in car video based on motion model," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 583-595, 2011.
- [74] Alexander Barth, *Vehicle Tracking and Motion Estimation Based on Stereo Vision Sequences.*: Bayerische Akademie der Wissenschaften, 2014.
- [75] Chenhao Wang, Zhencheng Hu, Shunsuke Kusuhara, and Keiichi Uchimura, "Vehicle

- localization with global probability density function for road navigation," in *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*, 2007, pp. 1033-1038.
- [76] Ryosuke Okuda, Yuki Kajiwara, and Kazuaki Terashima, "A survey of technical trend of ADAS and autonomous driving," in *VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA), Proceedings of Technical Program-2014 International Symposium on*, 2014, pp. 1-4.
- [77] Martin Buehler, Karl Iagnemma, and Sanjiv Singh, *The 2005 DARPA Grand Challenge: the great robot race.*: Springer Science & Business Media, 2007, vol. 36.
- [78] John Markoff, "Google cars drive themselves, in traffic," *The New York Times*, vol. 10, p. A1, 2010.
- [79] Albert Lam, Yiu-Wing Leung, and Xiaowen Chu, "Autonomous Vehicle Public Transportation System: Scheduling and Admission Control," *arXiv preprint arXiv:1502.07242*, 2015.
- [80] Arnaud De La Fortelle et al., "Network of automated vehicles: the autonet2030 vision," in *21st World Congress on Intelligent Transport Systems*, 2014.
- [81] Victor Gradinescu, Cristian Gorgorin, Raluca Diaconescu, Valentin Cristea, and Liviu Iftode, "Adaptive traffic lights using car-to-car communication," in *Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th*, 2007, pp. 21-25.
- [82] Christian Priemer and Bernhard Friedrich, "A decentralized adaptive traffic signal control using V2I communication data," in *Intelligent Transportation Systems, 2009. ITSC'09. 12th International IEEE Conference on*, 2009, pp. 1-6.
- [83] S, Claude Chaudet, and Isabelle Demeure, "A distributed algorithm for adaptive traffic lights control," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, 2012, pp. 1572-1577.
- [84] Noah J Goodall, Brian L Smith, and Byungkyu (Brian) Park, "Traffic Signal Control with Connected Vehicles," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2381, no. 1, pp. 65-72, 2013.
- [85] Huide Zhou, Rachid Bouyekhf, and Abdellah El Moudni, "An Approach of Model Predictive Control for Urban Transportation Network," in *Large Scale Complex Systems Theory and Applications*, vol. 13, 2013, pp. 490-495.
- [86] Xue Yang, Jie Liu, NF Vaidya, and Feng Zhao, "A vehicle-to-vehicle communication protocol for cooperative collision warning," in *Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, 2004. MOBIQUITOUS 2004. The First Annual International Conference on*, 2004, pp. 114-123.

- [87] Han-Shue Tan and Jihua Huang, "DGPS-based vehicle-to-vehicle cooperative collision warning: Engineering feasibility viewpoints," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 4, pp. 415-428, 2006.
- [88] Ismail H Zohdy and Hesham Rakha, "Game theory algorithm for intersection-based cooperative adaptive cruise control (CACC) systems," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, 2012, pp. 1097-1102.
- [89] Ismail H Zohdy, Raj Kishore Kamalanathsharma, and Hesham Rakha, "Intersection management for autonomous vehicles using iCACC," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, 2012, pp. 1109-1114.
- [90] R Naumann, R Rasche, J Tacke, and C Tahedi, "Validation and simulation of a decentralized intersection collision avoidance algorithm," in *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC'97., IEEE Conference on*, 1997, pp. 818-823.
- [91] John S Baras, Xiaobo Tan, and Pedram Hovareshti, "Decentralized control of autonomous vehicles," in *Decision and Control, 2003. Proceedings. 42nd IEEE Conference on*, vol. 2, 2003, pp. 1532-1537.
- [92] N Neuendorf and T Bruns, "The vehicle platoon controller in the decentralised, autonomous intersection management of vehicles," in *Mechatronics, 2004. ICM'04. Proceedings of the IEEE International Conference on*, 2004, pp. 375-380.
- [93] Mark VanMiddlesworth, Kurt Dresner, and Peter Stone, "Replacing the stop sign: Unmanaged intersection control for autonomous vehicles," in *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 3*, 2008, pp. 1413-1416.
- [94] Laleh Makarem and Denis Gillet, "Decentralized coordination of autonomous vehicles at intersections," in *World Congress*, vol. 18, 2011, pp. 13046-13051.
- [95] Matthias Gr, Carsten Rust, and Ulf Witkowski, "Using mini robots for prototyping intersection management of vehicles," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMiRE 2005)*, 2006, pp. 287-292.
- [96] Kurt Dresner and Peter Stone, "Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism," in *Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, 2004, pp. 530-537.
- [97] Kurt Dresner and Peter Stone, "Multiagent traffic management: An improved intersection control mechanism," in *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, 2005, pp. 471-477.

- [98] Kurt Dresner and Peter Stone, "Human-usable and emergency vehicle-aware control policies for autonomous intersection management," in *Fourth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation (ATT)*, Hakodate, Japan, 2006.
- [99] Kurt M Dresner and Peter Stone, "Sharing the Road: Autonomous Vehicles Meet Human Drivers.," in *IJCAI*, vol. 7, 2007, pp. 1263-1268.
- [100] Kurt Dresner and Peter Stone, "Mitigating catastrophic failure at intersections of autonomous vehicles," in *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 3*, 2008, pp. 1393-1396.
- [101] Kurt M Dresner and Peter Stone, "A Multiagent Approach to Autonomous Intersection Management.," *J. Artif. Intell. Res.(JAIR)*, vol. 31, no. 1, pp. 591-656, 2008.
- [102] Tsz-Chiu Au and Peter Stone, "Motion Planning Algorithms for Autonomous Intersection Management.," in *Bridging the Gap Between Task and Motion Planning*, 2010.
- [103] Tsz-Chiu Au, Neda Shahidi, and Peter Stone, "Enforcing Liveness in Autonomous Traffic Management.," in *AAAI*, 2011.
- [104] Abdeljalil Abbas-Turki et al., "Using robots for prototyping autonomous intersection management: feasibility and feedbacks.," in *1st IFAC Conference on Embedded Systems, Computational Intelligence and Telematics in Control, CESCIT 2012*, 2012, pp. 308-313.
- [105] Chien-Liang Fok et al., "A platform for evaluating autonomous intersection management policies," in *Cyber-Physical Systems (ICCPS), 2012 IEEE/ACM Third International Conference on*, 2012, pp. 87-96.
- [106] Rodrigo Silva, Satoru Noguchi, Thierry Ernst, Arnaud De La Fortelle, and Walter Godoy Junior, "Standards for Cooperative Intelligent Transportation Systems: a Proof of Concept," in *AICT 2014, The Tenth Advanced International Conference on Telecommunications*, 2014, pp. 35-40.
- [107] Michael Quinlan, Tsz-Chiu Au, Jesse Zhu, Nicolae Sturca, and Peter Stone, "Bringing simulation to life: A mixed reality autonomous intersection," in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, 2010, pp. 6083-6088.
- [108] Arnaud de La Fortelle, "Analysis of reservation algorithms for cooperative planning at intersections," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on*, 2010, pp. 445-449.
- [109] Joyoung Lee and Byungkyu Park, "Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment,"

- Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 1, pp. 81-90, 2012.
- [110] Jean Gregoire, Silv, and Arnaud de La Fortelle, "Priority-based coordination of robots," *arXiv preprint arXiv:1306.0785*, 2013.
- [111] Xiangjun Qian, Jean Gregoire, Fabien Moutarde, and Arnaud De La Fortelle, "Priority-based coordination of autonomous and legacy vehicles at intersection," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, 2014, pp. 1166-1171.
- [112] Aur, Abdeljalil Abbas-Turki, Rachid Bouyekhf, and Abdellah El Moudni, "A dioid model for invariant resource sharing problems," *Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on*, vol. 39, no. 4, pp. 770-781, 2009.
- [113] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni, "Cooperative driving: an ant colony system for autonomous intersection management," *Applied Intelligence*, vol. 37, no. 2, pp. 207-222, 2012.
- [114] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni, "Discrete methods for urban intersection traffic controlling," in *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, 2009, pp. 1-5.
- [115] Lu, Ricardo Parafita, S, and Urbano Nunes, "Intelligent Traffic Management at Intersections: Legacy Mode for Vehicles not Equipped with V2V and V2I Communications," *COMMUNICATIONS*, vol. 2, p. V2I.
- [116] Florent Perronnet et al., "Cooperative intersection management: Real implementation and feasibility study of a sequence based protocol for urban applications," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2012 15th International IEEE Conference on*, 2012, pp. 42-47.
- [117] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, Aurelien Correia, and Abdellah El Moudni, "Discrete intersection signal control," in *Service Operations and Logistics, and Informatics, 2007. SOLI 2007. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 1-6.
- [118] Florent Perronnet, Abdeljalil Abbas-Turki, Abdellah El-Moudni, Jocelyn Buisson, and Renan Z, "Cooperative Vehicle-Actuator System: A sequence-based optimal solution algorithm as tool for evaluating policies," in *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 19-24.
- [119] Jia Wu, Abdeljalil Abbas-Turki, and Florent Perronnet, "Cooperative driving at isolated intersections based on the optimal minimization of the maximum exit time," *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 23, no. 4, pp. 773-785, 2013.

- [120] Jia Wu, Florent Perronnet, and Abdeljalil Abbas-Turki, "Cooperative vehicle-actuator system: a sequence-based framework of cooperative intersections management," *Intelligent Transport Systems, IET*, vol. 8, no. 4, pp. 352-360, 2014.
- [121] Jia Wu, "Utilisation de la conduite coopérative pour la régulation de trafic dans une intersection," Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Ph.D. dissertation 2011.
- [122] Angela Di Febbraro, Davide Giglio, and Nicola Sacco, "Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets," *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 4, pp. 224-237, 2004.
- [123] Mourad Ahmane, Abdeljalil Abbas-Turki, Florent Perronnet, Jia Wu, and Abdellah El Moudni, "Modeling and controlling an isolated urban intersection based on cooperative vehicles," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 28, pp. 44-62, 2013.
- [124] Jean Gregoire, Emilio Frazzoli, Arnaud De La Fortelle, and Tichakorn Wongpiromsarn, "Back-pressure traffic signal control with unknown routing rates," *arXiv preprint arXiv:1401.3357*, 2013.
- [125] Michael Wines, "China's Growth Leads to Problems Down the Road," *New York Times*, vol. 27, 2010.
- [126] Abdeljalil Abbas-Turki, Cindy Cappelle, Franck Gechter, Florent Perronnet, and Abderrafaa Koukam, "Véhicule connecté sans conducteur," *REE. Revue de l'électricité et de l'électronique*, no. 4, pp. 45-53, 2014.
- [127] Carlos F Daganzo, "Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 1, pp. 49-62, 2007.
- [128] Arvind Giridhar and PR Kumar, "Scheduling automated traffic on a network of roads," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 55, no. 5, pp. 1467-1474, 2006.
- [129] Edward G Coffman, Melanie Elphick, and Arie Shoshani, "System deadlocks," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 3, no. 2, pp. 67-78, 1971.
- [130] Joaquin Ezpeleta, Fernando Tricas, Fernando Garcia-Valles, and Jos, "A banker's solution for deadlock avoidance in FMS with flexible routing and multiresource states," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 4, pp. 621-625, 2002.
- [131] Mark Lawley, Spyros Reveliotis, and Placid Ferreira, "The application and evaluation of banker's algorithm for deadlock-free buffer space allocation in flexible manufacturing systems," *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 73-100, 1998.

- [132] Luka Kalinovic, Tamara Petrovic, Stjepan Bogdan, and Vedran Bobanac, "Modified Banker's algorithm for scheduling in multi-AGV systems," in *Automation Science and Engineering (CASE), 2011 IEEE Conference on*, 2011, pp. 351-356.
- [133] NaiQi Wu and MengChu Zhou, "Shortest routing of bidirectional automated guided vehicles avoiding deadlock and blocking," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 12, no. 1, pp. 63-72, 2007.
- [134] Hongwei Liao et al., "Eliminating concurrency bugs in multithreaded software: A new approach based on discrete-event control," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 6, pp. 2067-2082, 2013.
- [135] Hongwei Liao et al., "Concurrency bugs in multithreaded software: Modeling and analysis using Petri nets," *Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 157-195, 2013.
- [136] Hongwei Liao, St. Spyros Reveliotis, Yin Wang, and Scott Mahlke, "Optimal liveness-enforcing control for a class of Petri nets arising in multithreaded software," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 5, pp. 1123-1138, 2013.
- [137] Heather J Ruskin and Ruili Wang, "Modeling traffic flow at an urban unsignalized intersection," in *Computational Science—ICCS 2002.*: Springer, 2002, pp. 381-390.
- [138] A Abbas-Turki, O Grunder, A El Moudni, and E Zaremba, "Sequence Optimization for Timetabling High Frequency Passenger Trains," in *2012 Joint Rail Conference*, 2012, pp. 831-836.
- [139] Steven Harrod, "Modeling network transition constraints with hypergraphs," *Transportation Science*, vol. 45, no. 1, pp. 81-97, 2011.
- [140] PTV Vision, VISSIM tutorial, 2009.
- [141] Florent Perronnet, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni, "Vehicle routing through deadlock-free policy for cooperative traffic control in a network of intersections: Reservation and congestion," in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on*, 2014, pp. 2233-2238.
- [142] Florent Perronnet, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El-Moudni, "Cooperative Intersection Management: Using mini-robots to compare sequenced-based protocols," in *Les Journées Nationales des Communications dans les Transports (JNCT)*, 2013.
- [143] Florent Perronnet, Abdeljalil Abbas-Turki, and Abdellah El Moudni, "A sequenced-based protocol to manage autonomous vehicles at isolated intersections," in *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on*, 2013, pp. 1811-1816.

- [144] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing, "Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations," *Physical Review E*, vol. 62, no. 2, p. 1805, 2000.
- [145] Arne Kesting, Martin Treiber, and Dirk Helbing, "Enhanced intelligent driver model to access the impact of driving strategies on traffic capacity," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 368, no. 1928, pp. 4585-4605, 2010.
- [146] Xuguang Hao, Abdeljalil Abbas-Turki, Florent Perronnet, and Rachid Bouyekhf, "V2I-based Velocity Synchronization at Intersection," *Mathematical Methods & Computational Techniques in Science & Engineering (MMCTE)*, pp. 67-72, 2014.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1.1 - Exemple d'intersection.....	6
Figure 1.2 - Exemple de cycle pour une intersection classique à quatre voies et douze mouvements	7
Figure 1.3 - Exemple de découpage d'un cycle en deux phases.....	8
Figure 1.4 - Boucle de régulation d'une intersection.....	9
Figure 1.5 – Utilisation des caméras pour remplir la fonction des boucles électromagnétique	11
Figure 1.6 - Principe de fonctionnement du véhicule actionneur.....	12
Figure 1.7 - Discrétisation temporelle d'un horizon de temps.....	14
Figure 1.8 - Exemple de passage d'une file de voitures au cours d'une phase	16
Figure 1.9 - Exemple de situation d'interblocage liée au dépassement de files	16
Figure 1.10 - Architecture décentralisée	25
Figure 1.11 - Architecture centralisée	26
Figure 1.12 - Architecture semi-centralisée	27
Figure 1.13 - Protocole de réservation	28
Figure 1.14 - Protocole de séquence	30
Figure 2.1 - Nouveau système de signalisation individuelle.....	33
Figure 2.2 - Formation d'un convoi de véhicules	34
Figure 2.3 - Marqueurs de position	35
Figure 2.4 - Découpage en zones du protocole SVAC	36
Figure 2.5 - Diagramme de classes du protocole SVAC.....	37
Figure 2.6 - Implémentation du protocole SVAC	38
Figure 2.7 – Exemple de situation d'interblocage	39
Figure 2.8 - Architecture de communication du protocole SVAC.....	40
Figure 2.9 - Environnement des tests réels	42
Figure 2.10 - Délimitation des zones dans l'environnement des tests réels	42
Figure 2.11 - Modèle RP d'une route	50
Figure 2.12 – Modèle RP du contrôleur d'intersection.....	51
Figure 2.13- Modèle réseau de Petri complet de l'intersection	52
Figure 2.14 - Exemple de séquence d'arrivée des véhicules	57
Figure 2.15 - Résolution de l'exemple.....	58
Figure 2.16 - Simulateur 3D.....	60
Figure 2.17 - Intersections étudiées.....	61
Figure 2.18 – Comparaison du nombre de véhicules pour FT / SVAC-PED / SVAC-SG	64
Figure 2.19 - Comparaison du temps perdu pour FT / SVAC-PED / SVAC-SG	64
Figure 2.20 - Comparaison FT / SVAC-PED pour une intersection à 4 branches comportant 3 mouvements	66
Figure 2.21 - Comparaison FT / SVAC-PED pour une intersection à 12 branches comportant 1 mouvement.....	67
Figure 2.22 - Gains de SVAC-PED sur la régulation par FT.....	68
Figure 3.1 – Exemples de situations simples d'interblocage dans un RI.....	74
Figure 3.2 - Exemple de situation complexe d'interblocage dans un RI	74
Figure 3.3 - Modélisation d'un réseau d'intersections élémentaire.....	76

Figure 3.4 - Exemples d'interblocage par "attente circulaire"	76
Figure 3.5 – Système de négociation du droit de passage individuel	79
Figure 3.6 - Architecture du protocole SVACRI	80
Figure 3.7 - Architecture de communication du protocole SVACRI.....	82
Figure 3.8 - Exemple de situation pouvant mener à l'interblocage dans un RI simple	83
Figure 3.9 - Mise à jour de l'exemple de RI simple	84
Figure 3.10 - Exemple du processus de déverrouillage des véhicules	85
Figure 3.11 - Réseau de 25 intersections connectées en grille.....	86
Figure 3.12 - Comparaison des protocoles SVAC, Kanban et SVACRI (100% de tout droit) 89	
Figure 3.13 - Comparaison des protocoles SVAC, Kanban et SVACRI (80% de tout droit).. 89	
Figure 3.14 - Comparaison de trois distributions de mouvements pour le SVACRI.....	90
Figure 3.15 - Exemple de représentation sous forme de graphe d'un RI	91
Figure 3.16 - Représentation sous forme de graphe d'un réseau de 25 intersections en grille. 93	
Figure 3.17 - Comparaison des politiques de routage : faible débit, trafic homogène.....	94
Figure 3.18 - Comparaison des politiques de routage : fort débit, trafic homogène	95
Figure 3.19 - Comparaison des politiques de routage : faible débit, trafic non homogène.....	96
Figure 4.1 - Découpage de la zone globale de conflit d'une intersection en zones locales de conflit	101
Figure 4.2 - Architecture de communication du protocole MIT	101
Figure 4.3 - Considération du véhicule leader par le véhicule suiveur dans le protocole MIT	104
Figure 4.4 - Principe du croisement dans le protocole MIT.....	105
Figure 4.5 – Intersection de mini-robots NXT	107
Figure 4.6 - Comparaison des temps entre deux véhicules dans SVAC et MIT	107
Figure 4.7 – Comparaison des méthodes MIT avec un temps de communication variable... 112	
Figure 4.8 - Principe de la fonction de suivi RAV-TR	115
Figure 4.9 - Scénarii pour la comparaison des politiques de suivi de véhicule	116
Figure 4.10 - IDM (scénario initial)	118
Figure 4.11 - RAV-TR (scénario initial)	118
Figure 4.12 - IDM (scénario n°1: file de véhicules)	119
Figure 4.13 – RAV-TR (scénario n°1: file de véhicules).....	119
Figure 4.14 - IDM (scénario n°2 : file de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader).....	120
Figure 4.15 – RAV-TR (scénario n°2 : file de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader).....	120
Figure 4.16 - CIDM (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules)	121
Figure 4.17 - IDM (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules).....	121
Figure 4.18 - RAV-TR (scénario n°3: croisement de deux files de véhicules).....	122
Figure 4.19 - CIDM (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader).....	123
Figure 4.20 - IDM (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader).....	123
Figure 4.21 - RAV-TR (scénario n°4: croisement de deux files de véhicules avec freinage d'urgence du véhicule leader).....	123

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 – Notations pour le problème de la Solution Globale (SG).....	46
Tableau 2.2 - Signification des transitions du RP d'une route	50
Tableau 2.3 - Signification des transitions du RP du contrôleur d'intersection	51
Tableau 2.4 – Correspondance entre débit par seconde et débit par heure	66
Tableau 3.1 - Synthèse de la comparaison entre les politiques de routage	97
Tableau 4.1 - Paramètres pour la politique MIT	103
Tableau 4.2- Paramètres du modèle IDM	108

LISTE DES ACRONYMES

AB	Algorithme du Banquier
ACC	Adaptive Cruise Control
CACC	Cooperative Adaptive Cruise Control
CIDM	Cooperative Intelligent Driver Model
CRONOS	ContROl of Networks by Optimisation of Switchovers
DAB	Détection Automatique des Bouchons
DAI	Détection Automatique des Incidents
DGPS	Differential Global Positioning System
DSRC	Dedicated Short-Range Communications
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
ERTMS	European Rail Traffic Management System
GLONASS	GLObal Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
IDM	Intelligent Driver Model
INRETS	Institut National de REcherche sur les Transports et leur Sécurité
IRNSS	Indian Regional Navigation Satellite System
ITS	Intelligent Transportation System
LIDAR	Light Detection And Ranging
MAS	Multi-Agent System
MCI	Management Coopératif d'Intersection
MIT	Management d'Intersection Transparent
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OD	Origine Destination
OPAC	Optimization Policies for Adaptive Control
OR	Obstacle Réel
OVP	Obstacle Virtuel Préprogrammé
OVS	Obstacle Virtuel de Séquence
PAPS	Premier Arrivé Premier Servi
PED	Politique d'Evacuation Distribuée
PEDA	Politique d'Evacuation Distribuée pour véhicules Autonomes
PEDH	Politique d'Evacuation Distribuée pour conducteur Humains
PRC	Politique de Routage par Congestion
PRD	Politique de Routage par Distance
PRR	Politique de Routage par Réservation
RAV-TR	Régulateur Adaptatif de Vitesse – Temps de Réaction
RCAV	Régulateur Coopératif Adaptatif de Vitesse
RFID	Radio-Frequency IDentification
RI	Réseau d'Intersections
RTK	Real Time Kinematic
SFF	Système de Fabrication Flexible
SG	Solution Globale
SIREDO	Système Informatisé de REcueil de DONnées
SVAC	Système Véhicule Actionneur Coopératif
SVACRI	Système Véhicule Actionneur Coopératif pour les Réseaux d'Intersections

UTOPIA	Urban Traffic Optimization by Integrated Automation
V2I	Vehicle to Vehicle
V2V	Vehicle to Infrastructure
VGA	Véhicule à Guidage Automatique
WAAS	Wide Area Augmentation System
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access
ZGC	Zone Globale de Conflit
ZLC	Zone Locale de Conflit

Résumé :

Dans ce travail, nous exploitons le potentiel offert par les véhicules autonomes coopératifs, pour fluidifier le trafic dans une intersection isolée puis dans un réseau d'intersections. Nous proposons le protocole SVAC (Système du Véhicule Actionneur Coopératif) permettant de réguler une intersection isolée. SVAC est basé sur une distribution individuelle du droit de passage qui respecte un ordre précis donné par une séquence de passage. Pour optimiser la séquence de passage, nous définissons la politique PED (Politique d'Evacuation Distribuée) permettant d'améliorer le temps d'évacuation total de l'intersection. La création de la séquence de passage est étudiée à travers deux modélisations. Une modélisation sous forme de graphes permettant le calcul de la solution optimale en connaissant les dates d'arrivée de tous les véhicules, et une modélisation de type réseaux de Petri avec dateurs pour traiter la régulation temps-réel. Des tests réels avec des véhicules équipés ont été réalisés pour étudier la faisabilité du protocole SVAC. Des simulations mettant en jeu un trafic réaliste permettent ensuite de montrer la capacité de fluidifier le trafic par rapport à une régulation classique par feux tricolores. La régulation d'un réseau d'intersections soulève les problèmes d'interblocage et de réorientation du trafic. Nous proposons le protocole SVACRI (Système du Véhicule Actionneur Coopératif pour les Réseaux d'Intersections) qui permet d'éliminer à priori les risques d'interblocage à travers la définition de contraintes d'occupation et de réservation de l'espace et du temps. Nous étudions également la possibilité d'améliorer la fluidité du trafic à travers le routage des véhicules, en tirant avantage du protocole SVACRI. Enfin, nous généralisons le système de régulation proposé pour la synchronisation des vitesses aux intersections.

Mots-clés : Régulation d'intersections, V2X, Véhicule autonome, Interblocage, Optimisation combinatoire

Abstract:

The objective of this work is to use the potential offered by the wireless communication and autonomous vehicles to improve traffic flow in an isolated intersection and in a network of intersections. We define a protocol, called CVAS (Cooperative Vehicle Actuator System) for managing an isolated intersection. CVAS distributes separately the right of way to each vehicle according to a specific order determined by a computed sequence. In order to optimize the sequence, we define a DCP (Distributed Clearing Policy) to improve the total evacuation time of the intersection. The control strategy is investigated through two modeling approaches. First graph theory is used for calculating the optimal solution according to the arrival times of all vehicles, and then a timed Petri Net model is used to propose a real-time control algorithm. Tests with real vehicles are realized to study the feasibility of CVAS. Simulations of realistic traffic flows are performed to assess our algorithm and to compare it versus conventional traffic lights. Managing a network of intersections raises the issue of gridlock. We propose CVAS-NI protocol (Cooperative Vehicle actuator system for Networks of Intersections), which is an extension of CVAS protocol. This protocol prevents the deadlock in the network through occupancy and reservation constraints. With a deadlock free network we extend the study to the traffic routing policy. Finally, we generalize the proposed control system for synchronizing the vehicle velocities at intersections.

Keywords: Intersection management, V2X, Autonomous vehicle, Deadlock, Combinatorial optimization

The logo for SPIM (École doctorale SPIM) features the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a large, white, sans-serif font. The 'S' is stylized with a blue horizontal bar to its left.