



HAL
open science

Contribution à la modélisation et à la commande des feux de signalisation par réseaux de Petri hybrides

Bassem Sammoud

► **To cite this version:**

Bassem Sammoud. Contribution à la modélisation et à la commande des feux de signalisation par réseaux de Petri hybrides. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard; Université de Tunis El Manar, 2015. Français. NNT : 2015BELF0262 . tel-01501909

HAL Id: tel-01501909

<https://theses.hal.science/tel-01501909>

Submitted on 4 Apr 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.

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE
UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT-MONTBELIARD

UNIVERSITE DE TUNIS EL MANAR
ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS

THÈSE

présentée par

Bassem SAMMOUD

pour l'obtention du grade de

Docteur en Génie Électrique

spécialité

Automatique

Doctorat délivré conjointement par l'Université de Franche-Comté, l'Université de Technologie
Belfort-Montbéliard et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

**Contribution à la modélisation et à la commande
des feux de signalisation par réseaux de Petri hybrides**

soutenue le 04 septembre 2015 devant le jury d'Examen, composé de :

M ^f Nouredine ELLOUZE	Professeur	ENIT, Tunisie	Président
M ^f Pierre BORNE	Professeur	EC-Lille, France	Rapporteur
M ^f Moncef GASMI	Professeur	INSAT, Tunisie	Rapporteur
M ^f Abdellah EI MOUDNI	Professeur	UTBM, France	Directeur
M ^f Mohamed BENREJEB	Professeur	ENIT, Tunisie	Directeur
M ^f Mahjoub DRIDI	Maître de Conférences	UTBM, France	Co-Directeur

Thèse préparée au sein du Laboratoire Systèmes et Transports de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
et au Laboratoire de Recherche Automatique LARA de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Avant-propos

Les travaux, que nous présentons dans ce mémoire, ont été effectués en collaboration entre le Laboratoire Systèmes et Transport (SET) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM) et le Laboratoire LARA-Automatique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis (ENIT).

Nous sommes particulièrement sensible au grand honneur que Monsieur le Professeur Nouredine ELLOUZE nous a fait, en acceptant de présider notre Jury de Thèse. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

C'est un agréable devoir pour nous d'exprimer notre très vive reconnaissance à Monsieur Abdellah EL MOUDNI, Professeur à l'UTBM et Directeur de l'Équipe Évaluation et Conduite de Systèmes (ECS) du (SET), à Monsieur Mohamed BENREJEB, Professeur à l'ENIT et Directeur du Laboratoire LARA-Automatique à l'ENIT et à Monsieur Mahjoub DRIDI, Maître de Conférences (HdR) à l'UTBM, pour nous avoir guidé et soutenu durant toute l'élaboration de ces travaux et pour les conseils éclairés qu'ils nous ont prodigués.

Nous tenons à exprimer notre très vive reconnaissance à Monsieur Pierre BORNE, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille (EC-Lille) et à Monsieur Moncef GASMI, Professeur à l'Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT), pour avoir bien voulu rapporter sur nos travaux de Thèse. Nous leur adressons nos sincères remerciements.

Nous adressons, enfin, un grand merci à tous les chercheurs du Laboratoire SET de l'UTBM et du laboratoire LARA-Automatique de l'ENIT et toute autre personne qui, par leur soutien, par leur amicale présence et par leur sympathie, ont rendu ce travail agréable. Nous leur exprimons ici toute notre gratitude.

A mes très chers parents

A ma grand-mère

A ma sœur et mon frère

A toute ma famille

A mes amis

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1.....	4
Analyse et caractérisation du trafic routier	4
Introduction.....	5
1.1 Le trafic routier	5
1.1.1 Les autoroutes	7
1.1.2 Les intersections.....	7
1.2. Modélisation du trafic	8
1.2.1 Les différents types de modèles microscopiques	9
1.2.1.1 Les modèles de poursuite	9
1.2.1.2 Les modèles de particules.....	12
1.2.2 Les caractéristiques des modèles macroscopiques.....	12
1.2.2.1 Les variables du modèle macroscopique.....	12
1.2.2.2 Modèles du premier ordre	14
1.2.2.3 Modèles d'ordre supérieur.....	16
1.3. La problématique urbaine	17
1.3.1 Position du problème.....	17
1.3.2 Le recueil des données	18
1.3.2 Les causes des dysfonctionnements au carrefour.....	18
1.3.2.1 Cas des dysfonctionnements externes	18
1.3.2.2 Cas des dysfonctionnements internes.....	19
1.4. Présentation du carrefour à feux étudié	19
1.4.1 Configuration du carrefour étudié.....	19

1.4.2	Caractéristiques du carrefour à feux étudié.....	20
1.4.3	Notion de conflit	22
1.4.4	Découpage en phases	23
1.4.5	Paramètres nécessaires au calcul de la durée des feux.....	24
1.5.	Les différentes stratégies de régulation via les feux de signalisation	25
1.5.1	Stratégie prédéterminée ou cyclique	26
1.5.2	Stratégie semi-adaptative ou acyclique	27
1.5.3	Stratégie adaptative ou temps réel.....	28
1.6.	Gestion de feux de carrefours – Position du problème	29
	Conclusion	30
	Chapitre 2.....	31
	Modélisation par réseaux de Petri hybrides proposée pour le trafic dans les intersections	31
	Introduction.....	32
2.1.	Notions de base sur les réseaux de Petri (RdPs).....	32
2.1.1	Choix des RdPs comme outil de modélisation.....	33
2.1.2	Idée de base sur le choix des RdPs hybrides.....	34
2.1.2.1	Les RdPs Autonomes	34
2.1.2.2	Les RdPs Temporisés	36
2.1.2.3	RdPs Continus à Vitesses variables (RdPCV)	37
2.1.2.4	Les RdPs Hybrides	39
2.2.	Modélisation du carrefour étudié	40
2.2.1	Description d'une route.....	41
2.2.2.	Modélisation d'une section de route et évolution d'un RdPCV	41
2.2.3	Modèle RdP hybride proposé pour un croisement simple de deux files.....	46
2.2.4.	Modèle RdP hybride proposé pour un carrefour global étudié	48
2.3.	Approche de simplification de la modélisation d'un carrefour	52
	Conclusion	57

Chapitre 3 :.....	59
Heuristique et stratégie de contrôle proposée pour la régulation du trafic	59
Introduction.....	60
3.1. Performances souhaitées pour le trafic	61
3.1.1. Les données sur les véhicules	61
3.1.2. Les critères à optimiser	63
3.2. Détermination de la longueur de la file d'attente proposée pour la multiprogrammation à temps fixe.....	63
3.2.1. Méthode et algorithme pour le calcul de la file d'attente.....	63
3.2.1.1 Méthode.....	63
3.2.1.2. Algorithme.....	65
3.2.2. Mise en œuvre de la méthode	65
Remarque sur la multiprogrammation à temps fixe	67
3.3. Méthodes de détermination du temps total d'évacuation	68
3.3.1. Idée de base et analogie intersection-montre	68
3.3.1.1. Idée de base	68
3.3.1.2 Analogie intersection-montre	69
3.3.2. Première heuristique proposée pour le calcul de la durée du feu vert pour les flux de tourner à gauche	70
3.3.2.1. Méthode de calcul	70
3.3.2.2. Mise en œuvre de la première heuristique proposée	71
3.3.3. Deuxième heuristique proposée pour le calcul de la durée du feu vert pour les flux importants	72
3.3.3.1. Méthode de calcul	72
3.3.3.2. Mise en œuvre de la deuxième heuristique proposée.....	73
3.3.4. Résultats obtenus par les deux heuristiques proposées	73
3.4. Stratégies proposées pour la détermination des temps d'attente accumulés par les véhicules	79

3.4.1. Stratégie de calcul des temps d'attente proposée par combinaison de cycles à phases variables.....	79
3.4.1.1. Modèle RdPH du carrefour étudié.....	82
3.4.1.2. Choix de base pour le calcul des temps d'attente.....	86
3.4.2. Mise en œuvre des résultats	88
3.4.2.1. Calcul des temps d'attente en utilisant la stratégie de combinaison à partir des durées des feux vert prédéfinies.....	88
3.4.2.2. Calcul des temps d'attente en utilisant la stratégie de combinaison de cycles à partir de l'heuristique proposée	96
Conclusion	102
Conclusion générale.....	104
Bibliographie	106

Liste des Figures

Figure 1. 1. Intersection à quatre branches avec des voies différentes	8
Figure 1. 2. Caractéristique du trafic dans une section d'une route.....	15
Figure 1. 3. Diagramme fondamental	16
Figure 1. 4. Configuration du carrefour étudié	20
Figure 1. 5. Zone fonctionnelle d'un carrefour simple de deux routes à sens unique	21
Figure 1. 6. Exemples de conflits dans un carrefour.....	22
Figure 1. 7. Structure du carrefour à 4 phases	24
Figure 2. 1. Caractéristique d'une section de route générique.....	41
Figure 2. 2. Modélisation d'une section de la route.....	42
Figure 2. 3. Gestion du trafic dans une section de route.....	43
Figure 2. 4. Phases correspondant aux équations de marquage.....	46
Figure 2. 5. Modèle RdPH d'un croisement de 2 flux.....	47
Figure 2. 6. Evolutions des flux relatifs aux voies 8 et 11	48
Figure 2. 7. Modèle RdPH global du carrefour étudié.....	50
Figure 2. 8. Evolution du marquage mi au cours du temps	55
Figure 2. 9. Evolution de la file d'attente (c) et du marquage (b) pour une phase de feu vert de 40 secondes en fonction des évolutions du débit (a)	56
Figure 2. 10. Evolution de la file d'attente (c) et du marquage (b) pour une phase de feu vert de 40 secondes en fonction des évolutions du débit faible (a)	57
Figure 3. 1. File d'attente pour le temps de cycle 60s	66
Figure 3. 2. File d'attente pour les différents temps de cycle 60s, 90s et 240s	67
Figure 3. 3. Analogie entre la montre et le carrefour à feux.....	69
Figure 3. 4. Temps de démarrage	71

Figure 3. 5. Evolutions des marquages relatives à Sim 1.	74
Figure 3. 6. Evolutions des marquages relatives à Sim 2.	75
Figure 3. 7. Evolutions des marquages relatives à Sim 3 (cas a).....	76
Figure 3. 8. Evolutions des marquages relatives à Sim 3 (cas b).	76
Figure 3. 9. Evolutions des marquages relatives à Sim 4.	77
Figure 3. 10. Comparaison des résultats pour différents nombres de véhicules.....	78
Figure 3. 11. Réseau de Petri continu proposé pour les flux à l'arrivée d'une d'intersection	84
Figure 3. 12. Réseau de Petri discret proposé pour les feux de signalisation de l'intersection étudiée	85
Figure 3. 13. Les 27 combinaisons des différents cycles.....	87
Figure 3. 14. Calcul des retards relatif aux 4 groupes de flux et à 27 véhicules	90
Figure 3. 15. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 80 véhicules	93
Figure 3. 16. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 225 véhicules	93
Figure 3. 17. Retards comparés des 3 premières simulations.....	94
Figure 3. 18. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 73 véhicules	95
Figure 3. 19. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij} pour le cas de 27 véhicules pour la simulation 1	97
Figure 3. 20. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij}	98
Figure 3. 21. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij}	98
Figure 3. 22. Comparaison entre les 2 stratégies considérées.....	99
Figure 3. 23. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 32 véhicules	101
Figure 3. 24. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 80 véhicules	101
Figure 3. 25. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 240 véhicules	101

Liste des Tableaux

Tableau 2. 1. Les paramètres et leurs significations	43
Tableau 3. 1 Nombre de véhicules arrivant de la simulation 1.....	62
Tableau 3. 2. Nombre de véhicules arrivant de la simulation 2.....	62
Tableau 3. 3. Nombre de véhicules arrivant de la simulation 3.....	62
Tableau 3. 4. Correspondance entre une montre et une intersection	70
Tableau 3. 5. Les paramètres relatifs à la simulation 1.....	74
Tableau 3. 6. Temps d'évacuation total	78
Tableau 3. 7. Cas d'un cycle à durées de phase fixes	81
Tableau 3. 8. Cas d'un cycle à durées de phase variables	81
Tableau 3. 9. Nombre de véhicules arrivant dans l'intersection pour les 3 scénarii considérés.....	88
Tableau 3. 10. Temps d'arrivée des véhicules dans l'intersection	89
Tableau 3. 11. Temps d'attente calculés.....	89
Tableau 3. 12. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 2 (80 véhicules) .	91
Tableau 3. 13. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 3 (225 véhicules)	92
Tableau 3. 14. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 4 (73 véhicules)	95
Tableau 3. 15. Nombre de véhicules entrant dans l'intersection selon les scénarii.....	99
Tableau 3. 16. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 32 véhicules ..	100
Tableau 3. 17. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 80 véhicules .	100
Tableau 3. 18. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 240 véhicules	100

Introduction générale

L'amélioration du niveau de vie moyen et du taux d'équipements des ménages a permis au plus grand nombre d'accéder au déplacement en véhicules particuliers, induisant une circulation routière de plus en plus dense. C'est ainsi que les infrastructures ont été dimensionnées pour que leurs capacités d'écoulement correspondent au mieux à la demande, sans cesse croissante, surtout très marquée aux heures les plus chargées.

La particularité du trafic automobile est que l'infrastructure routière est, en fait, conçue selon une demande projetée à un certain instant pour répondre à un optimum collectif alors que chaque individu cherche à optimiser son déplacement tout en satisfaisant des critères placés au niveau individuel (Espié, 2002). Cette particularité fait du trafic automobile un phénomène difficile à analyser et à optimiser; et même si les modèles de simulation constituent des outils essentiels pour son analyse et sa compréhension; ce phénomène possède un certain nombre de caractéristiques qui le rendent également difficile à modéliser et génère des problèmes au niveau de la fluidité du trafic pouvant être à l'origine de l'apparition de phénomènes de congestion et de formation des files d'attente avec les retards correspondants.

Par ailleurs, les retards causés par les congestions ont un impact important sur la qualité de vie des usagers. En effet, les conducteurs, qui fréquentent les embouteillages, sont assez souvent sujets à des problèmes de stress, de bruits, etc., et à une augmentation de risque d'accidents. Ce phénomène, largement identifié comme une source indirecte de problèmes de santé, a de plus des conséquences directes sur l'augmentation de la consommation énergétique.

Le phénomène de congestion du trafic routier est ainsi un problème socio-économique crucial qui nécessite de rechercher des solutions adaptées pouvant être mises en œuvre en pratique.

Les programmes d'élargissement des infrastructures étant, dans le même temps, onéreux, techniquement et juridiquement difficiles à mettre en œuvre, l'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes, tant en terme de capacité qu'en terme de sécurité, s'avère donc comme étant un enjeu économique et social important. Elle n'est alors possible que par une meilleure compréhension des mécanismes régissant l'ensemble des phénomènes de trafic. Il est ainsi devenu incontournable de s'intéresser aux systèmes de régulation

dynamique du trafic dont le but est d'exploiter plus efficacement en temps réel les infrastructures existantes par l'emploi de techniques qui ont fait leurs preuves. Néanmoins, la commande du trafic, présentant encore plusieurs difficultés du fait de la complexité du problème à traiter, reste à ce jour un problème d'actualité et de nombreux centres de recherche en ont fait leur priorité. Dans ce contexte, la commande intelligente du trafic peut constituer un moyen efficace pour éliminer ou du moins alléger les effets de la congestion et de la formation des files d'attente.

La méthode classique adoptée, pour prévenir ces effets ou les réduire dans les villes modernes, est basée sur l'élaboration d'une signalisation routière adaptée. Le droit de passage est attribué ainsi aux usagers par l'utilisation de feux de couleurs standards (rouge-orange/jaune-vert) qui peut permettre de résoudre les conflits entre les différents flux de circulation aux carrefours. Le contrôle de la signalisation du trafic au niveau des carrefours se divise, généralement, en deux catégories : la stratégie de contrôle à plan de feux fixe, c'est-à-dire avec un cycle fixé, et la stratégie de contrôle adaptative, permettant des changements de durées de phases en fonction de la demande du trafic. Les deux stratégies sont généralement basées sur l'estimation du débit du trafic.

De manière schématique, un système de contrôle dynamique du trafic est un système qui dispose de capteurs lui fournissant des informations sur l'état du trafic et, notamment, le nombre de véhicules sur certaines rues ou intersections du réseau routier. Ces informations sont alors transmises à un calculateur qui a pour rôle de donner aux commandes les valeurs de paramètres minimisant une certaine fonction exprimant la congestion du réseau routier, comme la longueur des files d'attente, le temps moyen d'attente, le temps moyen d'attente de la plus longue file d'attente et le temps d'évacuation globale.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la commande des feux de carrefour en vue de résoudre les problèmes liés à la congestion; dans ce sens, nous proposons une stratégie de contrôle du trafic en considérant chaque véhicule comme une entité indépendante et en calculant la durée des feux à intervalles réguliers, évitant ou minimisant la congestion.

Après le rappel des problématiques relatives à la modélisation et la commande des feux, nous présentons dans le premier chapitre, les différents types de modèles du trafic routier, microscopique et macroscopique ; les caractéristiques ainsi que les différentes approches dédiées à la commande de flux de trafic étudié sont, ensuite, introduites.

Dans le second chapitre, sont présentés les Réseaux de Pétri Hybrides (RdPH) comme outil de modélisation qui intègre aussi bien, le niveau de modélisation macroscopique que celui microscopique et deux modèles sont, respectivement, articulés sur les réseaux de Petri continus à vitesses variables et les réseaux de Petri discrets temporisés.

Le dernier chapitre concerne la minimisation de différentes fonctions du trafic routier comme le temps d'évacuation des véhicules au niveau du carrefour et les temps d'attente. Nous proposons, dans ce cadre, des méthodes de résolution approchées et des algorithmes associés afin de trouver, en un temps raisonnable, des séquences de passage satisfaisantes pour chaque carrefour.

Différents scénarii sont, enfin, considérés et étudiés par simulation afin d'évaluer les performances et d'illustrer l'efficacité et la mise en œuvre des algorithmes élaborés pour la gestion de carrefours.

Chapitre 1

Analyse et caractérisation du trafic routier

Introduction

Les systèmes de transport ont toujours joué un rôle primordial dans le développement d'un pays; mais, depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le phénomène de la congestion routière, en particulier, a induit, pendant les heures de pointe, un grand problème dû principalement, à l'accroissement rapide du nombre de véhicules et de la demande en transport. Il constitue, en effet, un problème crucial pour la société, à cause des coûts qu'il engendre.

Généralement, la congestion du trafic apparaît lorsqu'un nombre assez important de véhicules utilise une infrastructure routière commune, caractérisée par une capacité limitée. Elle peut, donc, conduire à la formation de files d'attente avec les retards excessifs correspondants. Pour réduire ou minimiser cette congestion, une commande adéquate du trafic devient une nécessité.

L'intérêt de contrôler les feux de circulation n'est plus à démontrer; les feux tricolores permettent, en effet, de supprimer certains points conflictuels entre les différents flux de circulation aux carrefours tout en partageant, dans le temps, l'utilisation d'un même espace. Ceci peut se réaliser par le choix des durées de chaque état des feux. Cette approche, applicable à court et à moyen termes, consiste à mettre en œuvre des actions et des mesures afin d'assurer une circulation sûre et fluide du trafic et à augmenter, ainsi, la qualité de service aux usagers.

Dans ce chapitre, sont présentés, d'une manière détaillée, un carrefour à feux isolé, les différents éléments le caractérisant ainsi que des méthodes de commande classiquement utilisées pour sa gestion.

1.1 Le trafic routier

Le trafic routier se définit comme l'ensemble des phénomènes complexes qui résulte du déplacement d'usagers sur un réseau routier à capacité limitée (Doniec, 2006).

Le réseau routier a été développé pour répondre aux demandes de déplacements et les routes conçues, tout au long de l'histoire, pour répondre notamment à la demande commerciale. Depuis quelques dizaines d'années, ces demandes sont complétées par celles liées aux déplacements domicile-travail et aux migrations de populations, lors des congés de fins de semaines et lors des vacances, en particulier.

Le réseau de voirie, en milieu urbain, comporte, essentiellement, trois niveaux établis par rapport aux fonctions urbaines. Pour chaque fonction, les caractéristiques géométriques, l'aspect et le comportement doivent être, tout trois, en adéquation (Certu, 2002). En effet, les caractéristiques géométriques doivent être adaptées à la vitesse et au débit que l'on recherche. L'aspect constitue un message pour l'automobiliste : toute inadéquation est ambiguë et génère un comportement dangereux tel qu'une vitesse inadaptée ou une mauvaise interaction avec les piétons.

Cette analyse permet de mettre en évidence deux catégories de voies dont la différenciation est nécessaire dans le traitement des carrefours : les voies rapides (les autoroutes) et les voies de quartier (les intersections). Cette catégorisation est analysée sous des angles multiples : la longueur, la capacité (débit maximum admissible ou débit de saturation) et le mode d'exploitation.

Le trafic routier peut être défini comme étant le résultat des déplacements des véhicules sur le réseau routier. Ce phénomène résulte, en fait, de l'interaction de chaque usager de la route avec la réglementation ainsi qu'avec son environnement, constitué par l'infrastructure routière (dimensionnement géométrique de la route) et les autres usagers. Le trafic routier est, donc, un phénomène naturellement distribué au sein duquel les interactions entre les différents participants constituent le cœur du fonctionnement.

Ce système de trafic possède les caractéristiques suivantes qui expliquent ses difficultés:

- dynamique: les phénomènes de trafic sont fortement dynamiques, le nombre d'intervenants inclus dans le système variant largement dans le temps. Une petite perturbation peut, par exemple, être amplifiée et se transformer en congestion,

- distribution: les phénomènes de trafic résultent de l'interaction de chaque usager de la route avec son environnement,

- hétérogénéité: le système de trafic routier fait intervenir différents acteurs dont les conducteurs hétérogènes (débutants/expérimentés), pouvant utiliser, par exemple, des véhicules de caractéristiques variées (poids lourds/légers),

- complexité: un système est qualifié de complexe lorsqu'un observateur ne peut prévoir son comportement ou son évolution ou qu'un de ses composants essentiels (le conducteur) a, par exemple, un comportement imprévisible.

1.1.1 Les autoroutes

Grâce à leurs topologies (multivoies, grandes lignes), les autoroutes offrent une bonne qualité de service. En effet, elles laissent circuler un grand nombre de véhicules, les vitesses des véhicules étant peu sensibles au changement de l'état du trafic (Yagar, 1991). Sur les routes urbaines, les vitesses de véhicules dépendent, par contre, de la densité du trafic.

Plusieurs travaux portent sur la modélisation des réseaux autoroutiers. Ceux-ci ont été basés sur des tests et la simulation des trafics pendant des heures en rapport avec des situations réelles sur une portion de plusieurs kilomètres d'autoroute présentant des bretelles d'accès et de sortie (Champion, 2002). C'est ainsi que plusieurs modèles ont été développés dont nous distinguons, entre autres, les modèles : META (Payne, 1971), SIMAUT (Morin, 1989) et METACOR (Elloumi, 1994) que nous n'exploiterons pas dans nos travaux.

1.1.2 Les intersections

Une intersection est située à la rencontre de plusieurs rues, déterminant des couloirs d'entrée et de sortie. Un couloir est caractérisé par sa largeur et le nombre de ses voies; certaines de ces voies (voies spéciales) peuvent être affectées par un flux particulier. Les courants des véhicules sont soit des courants directs, soit des courants de tourne à gauche, soit des courants de tourne à droite, figure 1.1. La mise en place d'un système de feux à un carrefour réalise une séparation dans le temps de l'admission de différents flux de véhicules.

Divers types de carrefours à feux peuvent être conçus et, pour des raisons de simplicité, sont souvent ramenés à un carrefour simple soit en décomposant ceux qui sont complexes en plusieurs carrefours simples, soit en ajoutant des tronçons fictifs pour les intersections à moins de quatre branches. Les carrefours peuvent être classés en deux catégories : les carrefours isolés et les carrefours coordonnés entre eux, constituant un réseau urbain.



Figure 1. 1. Intersection à quatre branches avec des voies différentes

(Photo prise par José Navarro)

1.2. Modélisation du trafic

Le développement rapide de la technologie automobile et l'augmentation énorme du trafic routier ont rendu nécessaire l'étude du trafic d'une manière mathématique précise, à travers des modèles capables de décrire sa dynamique dans l'espace et dans le temps.

Les premiers modèles mathématiques, proposés dans (Greenshields, 1935), ont été inspirés de la théorie de la mécanique des fluides, l'écoulement étant décrit par une équation parabolique, représentant la relation débit-densité. D'autres chercheurs, dans les années 1950, ont réalisé un développement considérable de la théorie du trafic par l'entremise de plusieurs approches telles que :

- le véhicule suiveur (Pipes, 1953), (Chandler, 1958), et (Herman, 1959),
- l'hydrodynamique (Lighthill, 1955), (Newell, 1955) et (Edie, 1958),
- et les files d'attente (Webster, 1958).

Compte tenu de leur multiplicité, les modèles du trafic ont été classés en deux catégories :

- les modèles microscopiques

- les modèles macroscopiques.

La régulation du trafic, utilisant un certain nombre de variables de flux et de relations caractéristiques, a permis de mieux comprendre et prévoir les interactions inter-véhiculaires ainsi que le mouvement global du flux au niveau de ce système.

Les variables de flux ont été classées en deux familles :

- les variables microscopiques qui sont inhérentes aux véhicules, considérés individuellement,

- et les variables macroscopiques qui caractérisent le trafic en tant qu'entité globale et contextuelle (Cohen, 1990).

1.2.1 Les différents types de modèles microscopiques

Les modèles microscopiques reposent sur une description du comportement individuel des véhicules, qui lorsqu'elle est fine, est réalisée en se basant sur les interactions entre les véhicules.

Ce type de modèle a pour ambition de s'approcher le plus possible du comportement réel des véhicules. Pour ce faire, ces modèles tentent de reproduire la façon avec laquelle réagit un véhicule en fonction de son environnement, c'est-à-dire l'infrastructure sur laquelle il circule et les véhicules qui l'entourent (distance avec les véhicules voisins, vitesse, accélération, ...).

La littérature mentionne deux grandes classes à la modélisation microscopique :

- la première est celle caractérisant les modèles véhicule-suiveur, (Pipes, 1953), (Herman, 1959) et (Gazis, 1961).

- la seconde est basée sur les modèles de particules, (Biham, 1992), (Fukui, 1996) et (Nagel, 1992).

1.2.1.1 Les modèles de poursuite

Les modèles de poursuite, appelés aussi modèles véhicule-suiveur, décrivent le comportement de tout véhicule par rapport au véhicule qui le précède.

Ces modèles sont utilisés pour représenter et analyser les mécanismes qui régissent les interactions entre les véhicules ainsi que le mouvement d'un ensemble de véhicules sur les infrastructures routières (Tolba, 2004).

Dans ces modèles, le conducteur joue un rôle primordial, en tant qu'élément de commande actif au sein de l'ensemble {véhicule, conducteur, route}, par des actions du conducteur sur le frein et sur l'accélérateur. Ces actions sont régies par une équation différentielle décrivant l'accélération du véhicule considéré, en respectant le comportement du véhicule qui le précède.

Les différents modèles véhicule-suiveur, existants, sont fondés sur le principe d'action-réaction, posé dans (Chandler, 1958) et dans d'autres travaux en utilisant la logique floue (Kikuchi, 1992). Celui-ci se résume sur le fait qu'un conducteur va percevoir un stimulus à l'instant t et réagit avec un certain décalage temporel, correspondant à son temps de réaction, noté τ . La réponse est considérée proportionnelle à l'intensité du stimulus, mais dépend de la sensibilité du conducteur :

$$\text{réaction}(t + \tau) = \text{sensibilité} \times \text{stimulus}(t) \quad (1.1)$$

Formellement, la relation stimulus-réaction du véhicule suiveur est modélisée selon l'une des deux approches générales : linéaire (Chandler, 1958) ou non-linéaire (Gazis, 1959).

Dans le modèle de poursuite linéaire, tous les couples véhicule-conducteur sont supposés identiques (même temps de réaction et même distance d'arrêt en cas de freinage brusque). Ce modèle est fondé sur l'hypothèse qu'un conducteur va adapter son accélération afin de rester en permanence à une certaine distance de sécurité du véhicule qui le précède. Le modèle linéaire est décrit, dans ce cas, par l'équation différentielle du second ordre suivante :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \tau) = \alpha [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)] \quad (1.2)$$

où $x_n(t)$ et $\ddot{x}_n(t)$ désignent, respectivement, la position et l'accélération longitudinales du $n^{\text{ième}}$ véhicule à l'instant t et α le coefficient de sensibilité.

Ce modèle est appelé linéaire du fait que l'accélération varie linéairement en fonction du différentiel de vitesse. Son principal inconvénient est qu'il ne prend pas en compte la

distance qui sépare les véhicules. La réaction du conducteur est, par exemple, la même pour un espacement de 20 ou de 100 mètres.

Afin d'améliorer ce modèle, est proposé, dans (Gazis, 1961), le modèle de poursuite non-linéaire qui considère que le coefficient de sensibilité α est inversement proportionnel à l'espace entre les véhicules :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \tau) = \frac{\alpha [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))} \quad (1.3)$$

Toutefois, ce modèle, correspondant à une meilleure description microscopique de l'écoulement du trafic, met en exergue un effet indésirable dans l'analyse macroscopique lié principalement à la vitesse libre du flot de véhicules qui tend vers l'infini, pour une densité nulle. Cet effet a conduit à une hypothèse selon laquelle l'accélération du véhicule-suiveur soit proportionnelle à la perception du conducteur aux taux de changement de l'angle de vision (Edie, 1961). Le modèle dérivé est régi par l'équation différentielle suivante :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \tau) = \frac{\alpha [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))^2} \quad (1.4)$$

Enfin, dans (Gazis, 1961), constatant que la réaction du conducteur à une vitesse élevée est très importante, est proposée la forme générale suivante :

$$\ddot{x}_{n+1}(t + \tau) = \alpha \dot{x}_{n+1}^m(t + \tau) \frac{[\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n+1}(t)]}{(x_n(t) - x_{n+1}(t))^l} \quad (1.5)$$

où m et l sont des constantes déterminées expérimentalement, dans les intervalles $m \in [-0.8, 2.7]$ et $l \in [0, 3]$.

Les modèles de poursuite considèrent que l'espace inter-véhiculaire est constant pour deux véhicules se déplaçant à la même vitesse.

1.2.1.2 Les modèles de particules

Les modèles de particules sont issus, principalement, de la théorie des Automates Cellulaires (AC), (Violina, 2006), qui constitue un outil de modélisation, capable de représenter d'une manière fine et rapide des comportements dynamiques complexes.

Son utilisation consiste à considérer les véhicules comme des particules interagissant entre elles. Le comportement des véhicules dans le réseau est décrit suivant leur déplacement dans la route découpée en un nombre fini de sites ou de cellules. La combinaison de tous les comportements des véhicules fournit une image globale des situations du trafic dans le réseau.

Les modèles de particules du trafic, consignés dans (Gerlough, 1956), ont été développés dans (Cremer, 1986) et dans (Biham, 1992). Un aspect stochastique a été ajouté dans (Fukui, 1996).

1.2.2 Les caractéristiques des modèles macroscopiques

Les variables macroscopiques du trafic permettent de décrire globalement le flot des véhicules sur une section de route et ignorent le comportement individuel des véhicules. Plus précisément, elles établissent des relations entre le débit du flux en nombre de véhicules par heure, sa densité en nombre de véhicules par kilomètre et sa vitesse moyenne en kilomètres par heure.

Les premiers travaux ont été initiés dans (Lighthill, 1955) et dans (Richards, 1956), avec la théorie de l'hydrodynamique. Dans (Payne, 1971) Payne a traité le trafic avec la théorie du fluide compressible de particules, en négligeant les dimensions des véhicules, et dans (Heidemann, 1996) l'auteur, avec la théorie des files d'attente qui quantifie le trafic, s'intéresse principalement aux processus d'arrivée et de départ des véhicules en des points particuliers de la route.

1.2.2.1 Les variables du modèle macroscopique

Le niveau macroscopique nécessite la définition d'un certain nombre de paramètres caractérisant le trafic dont la densité, le débit, la vitesse moyenne et le diagramme fondamental.

a. La densité du trafic

La densité caractérise la répartition des véhicules dans l'espace. La densité moyenne $k(x1, x2, t)$ à un instant t , sur une section de route limitée par les points d'abscisses $x1$ et $x2$, s'exprime par :

$$k(x1, x2, t) = \frac{n(x1, x2, t)}{x2 - x1} \quad (1.6)$$

où $n(x1, x2, t)$ désigne le nombre de véhicules présents sur la section $[x1, x2]$ à l'instant t .

Compte tenu que le flot de véhicules est continu, il résulte une autre définition de la densité $k(x, t)$ au point x et à l'instant t :

$$k(x, t) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} k(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}, t) \quad (1.7)$$

Remarque : la densité k dans un régime d'écoulement du trafic est inversement proportionnelle à l'espacement inter-véhiculaire moyen (Cohen, 1990) et peut être calculée à partir des taux d'occupation λ , mesurés par des boucles magnétiques :

$$k = \frac{\lambda}{L + l} \quad (1.8)$$

où L et l désignent respectivement la longueur moyenne des véhicules et celle du capteur.

b. Le débit du trafic

Le débit q , correspondant à la répartition des véhicules dans le temps, entre les instants $t1$ et $t2$ et au point x de la route, est donné par :

$$q(x1, x2, t) = \frac{n(t1, t2, x)}{t2 - t1} \quad (1.9)$$

où $n(t1, t2, x)$ est le nombre de véhicules passant par le point x entre les instants $t1$ et $t2$.

Les théories continues définissent le débit moyen à l'instant t et au point x par l'expression suivante :

$$q(x, t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right) \quad (1.10)$$

Une telle définition ne représente qu'une formulation mathématique et difficile à appliquer en ces termes à une théorie de l'écoulement de la circulation; car, la limite de q tend vers l'infini ou zéro selon qu'un véhicule se trouve ou pas au point x ; le débit, pour des petites valeurs de Δt , peut être exprimé par :

$$q(x, t) = q\left(t - \frac{\Delta t}{2}, t + \frac{\Delta t}{2}, x\right) \quad (1.11)$$

Remarque : pour un flot d'écoulement du trafic stationnaire, le débit moyen est inversement proportionnel au temps inter-véhiculaire moyen (Cohen, 1990).

c. La vitesse moyenne

La mécanique des fluides nous enseigne qu'un débit q est égal au produit de la concentration k par la vitesse du flot v : $q = k \times v$. La vitesse moyenne pour un flot d'écoulement du trafic à l'instant t et au point x , est définie par le rapport entre le débit et la densité tel que :

$$v(x, t) = \frac{q(x, t)}{k(x, t)} \quad (1.12)$$

1.2.2.2 Modèles du premier ordre

Le modèle du premier ordre, exploitant les concepts de base définissant un fluide compressible, approche la dynamique des flots de véhicules par trois principes essentiels : la représentation continue, l'équation de conservation et le diagramme fondamental.

a. La représentation continue

Cette représentation est relative à la considération du flot de véhicules comme un milieu continu. Sous cette hypothèse, les variables moyennes de trafic (débit, densité et vitesse) sont

considérées comme fonctions continues dans le temps. Il en découle que les dimensions des véhicules sont négligées (Payne, 1971).

b. L'équation de conservation

Cette représentation correspond à la réalité du trafic, contrairement au principe de continuité. Cohen a défini dans (Cohen, 1990) que la variation du nombre de véhicules sur une section de route $[x_i, x_{i+1}]$ est égale à l'écart entre la masse entrant en x_i et la masse sortant en x_{i+1} , entre les deux instants t_i et t_{i+1} , figure 1.2.

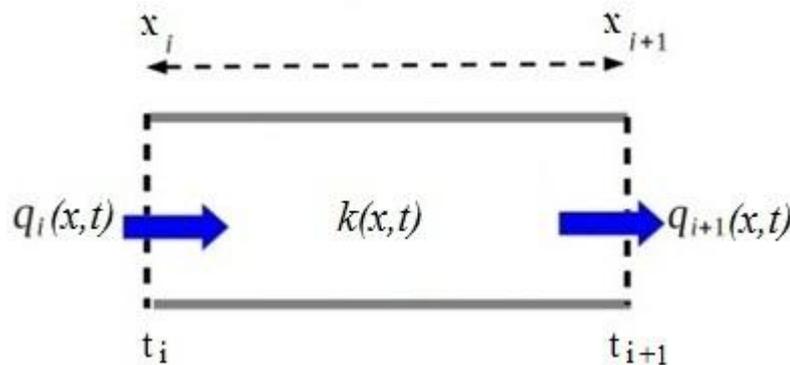


Figure 1. 2. Caractéristique du trafic dans une section d'une route

c. Le diagramme fondamental

Compte tenu du principe de continuité des flots de véhicules, la loi d'écoulement du trafic, sur une section de route donnée, peut être formulée par une relation algébrique liant le débit q et la densité k :

$$q = f(k(x,t)) \quad (1.13)$$

Le diagramme fondamental est sensible à de nombreux facteurs comme la géométrie de la route, la nature et la composition du trafic, les conditions météorologiques et les mesures d'exploitation. Outil pratique, bien adapté à divers problèmes de circulation, il joue un rôle précieux dans la conception et l'exploitation des infrastructures routières.

La figure 1.3 est la représentation la plus courante pour étudier un segment de route. Le diagramme fondamental permet, en effet, d'extraire visuellement les caractéristiques les plus

importantes de l'objet de l'étude et d'identifier, d'une part, la capacité du segment donné par le débit maximal et, d'autre part, le taux d'occupation critique qu'il ne faut pas dépasser pour éviter la congestion. En plus de ces qualités visuelles, la fonction identifiée du diagramme fondamental permet non seulement de calculer quelques indicateurs du trafic tels que les temps de parcours et la détection d'incidents, mais aussi elle constitue la base pour la simulation du modèle de poursuite utilisé au niveau microscopique.

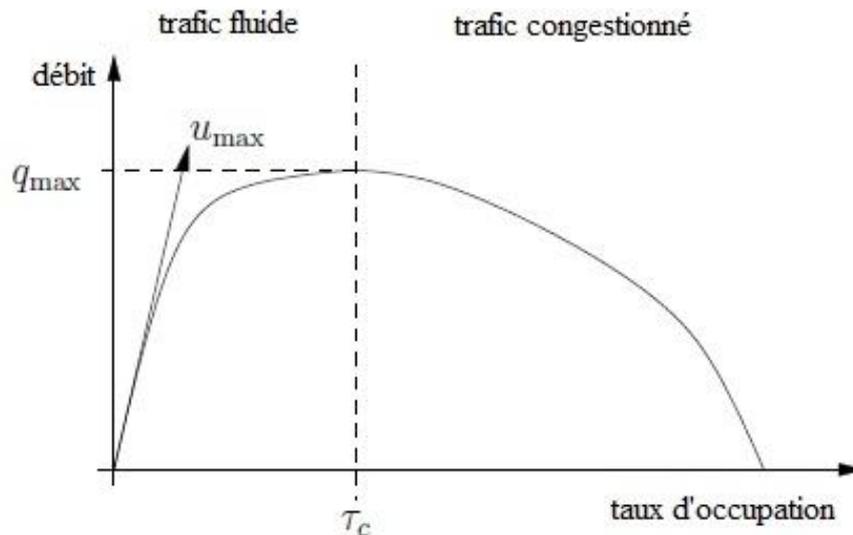


Figure 1. 3. Diagramme fondamental

A l'état fluide, les véhicules ne se gênent pas et circulent avec une vitesse moyenne généralement élevée, appelée vitesse libre et notée u_{max} , figure 1.3. Le débit continue d'augmenter avec la densité jusqu'à une certaine valeur de cette dernière, appelée densité critique τ_c , (Tolba, 2004), La valeur du débit, correspondant à cette densité, traduit la capacité de l'infrastructure.

1.2.2.3 Modèles d'ordre supérieur

Ces modèles ont été introduits dans le but d'améliorer le niveau de précision donnée par les modèles du premier ordre dans certains cas du trafic, à savoir les rétrécissements des autoroutes ou les convergences avec les rampes d'accès. Ce modèle a été proposé dans (Payne, 1971) et a été exploité par la suite dans le logiciel de simulation du trafic FREFLO dans (Payne, 1979). Les diverses applications, réalisées sur ce logiciel, ont montré que les

résultats numériques obtenus sont irréalistes (Tolba, 2004), notamment au niveau des rétrécissements de la chaussée ou de la convergence avec une rampe d'accès. En outre, le modèle produit un blocage du trafic trop important en phase de congestion. Ces faits ont été constatés et des extensions convenables du modèle ont été proposées par Papageorgiou dans (Papageorgiou, 1990). Toutefois, l'ensemble des modèles d'ordre supérieur développés a été soumis à des critiques rigoureuses, particulièrement au niveau de leur réalisme.

L'ensemble des contributions dans ce sens a montré que le modèle dynamique idéal du trafic n'existe pas encore et laisse la problématique de la modélisation, à ce jour, un sujet d'actualité.

1.3. La problématique urbaine

1.3.1 Position du problème

Le réaménagement ou la création d'un carrefour en milieu urbain ne doit pas se limiter à une réflexion ponctuelle à la fois dans l'espace et dans le temps. En effet, la problématique est plus complexe que celle du milieu interurbain où le bon fonctionnement d'un carrefour suppose:

- qu'il soit adapté au type de route sur lequel il se situe;
- qu'il soit adapté au site et aux conditions d'utilisation;
- que sa configuration générale et sa conception de détails soient correctes.

L'ensemble des questions posées par le milieu urbain est plus vaste et beaucoup plus interactif. Il est essentiel de prendre en compte le contexte environnant à l'échelle du quartier dans lequel se trouve le carrefour, voire même au niveau de la ville ou de l'agglomération.

Le fonctionnement d'un carrefour est aussi conditionné par le type :

- de la structure et du fonctionnement urbains ;
- du maillage du réseau de voirie.

La différence avec le milieu interurbain est due à une répartition différente des types d'utilisateurs (beaucoup plus de piétons, des deux-roues et des modes de transport en commun). De même, la typologie et la hiérarchie de la voie sur laquelle se trouve le carrefour lui confèrent une fonction particulière.

Ainsi, la prise en compte des politiques globales d'urbanisme, de déplacements et de projets d'infrastructures permet de mieux comprendre le fonctionnement d'un carrefour et de son évolution dans le temps.

1.3.2 Le recueil des données

La conception d'un carrefour en milieu urbain exige de recueillir un nombre important de données du fait de la complexité du système. Les problématiques aux échelles du quartier, du réseau de voirie, du nœud de communication se superposent et conditionnent fortement les dysfonctionnements au niveau du carrefour.

Il existe différents domaines d'investigation pour la conception d'un carrefour.

Le premier est relatif à la vie locale; ce domaine concerne le fonctionnement urbain (organisation du réseau de voirie et structure urbaine) et le fonctionnement des usagers (piétons, deux-roues, transports en commun, voitures et poids lourds).

Le second, relatif à l'approche fonctionnelle, s'intéresse au trafic et son déplacement, aux nuisances générées par la circulation automobile (bruit, pollution) et à la sécurité.

Le dernier est relatif à l'approche spatiale qui rassemble le site et son espace (morphologie et densité)

Le choix et le niveau d'investigation de ces données ne peuvent pas être prédéfinis. L'analyse des approches et les enjeux du carrefour permettent de sélectionner et de doser les différentes recherches d'informations.

1.3.2 Les causes des dysfonctionnements au carrefour

Les dysfonctionnements sont de deux natures : externes et internes.

1.3.2.1 Cas des dysfonctionnements externes

L'étude d'un carrefour ne se limite pas à l'emprise même de l'intersection. Il est important d'élargir le champ d'investigation au fonctionnement des voies qui s'y croisent. Il faut, pour cela, prendre en compte les carrefours situés en amont et en aval ainsi que les conditions générales de la circulation dans le quartier, ou du moins dans la zone d'influence du carrefour, comme :

- le mauvais fonctionnement des carrefours alentours, relatif aux problèmes de remontées de file d'attente d'un carrefour sur l'autre et à la mauvaise coordination entre les feux;
- les mouvements perturbateurs systématiques, relatifs aux manœuvres fréquentes de poids lourds à proximité immédiate du carrefour (livraisons) et aux arrêts de courte durée de véhicules sur la chaussée (présence d'un commerce de proximité tel qu'un bureau de tabac, ou d'un distributeur de billets). Dans ce cas, la solution consiste à organiser ces mouvements (prévoir des aires spécifiques) ou à les interdire physiquement ;
- le stationnement gênant, relatif aux manœuvres fréquentes de stationnement sur une des voies (ou sur un arrêt de bus ou sur une voie de bus) générant des files d'attente pouvant remonter jusqu'au carrefour.
- les arrêts de bus mal positionnés; en effet, un arrêt situé en aval d'un carrefour perturbe souvent moins la circulation générale qu'un arrêt placé en amont. Cette mesure permet également de positionner le passage piéton à l'arrière de l'arrêt de bus, au niveau du carrefour; ce qui présente de meilleures conditions de sécurité pour la visibilité du piéton qui le traverse. Enfin, cette position est préférable pour l'asservissement du feu vert à l'arrivée de bus.

1.3.2.2 Cas des dysfonctionnements internes

Ils sont relatifs aux paramètres dont l'influence peut être mise en évidence par un calcul de capacité théorique à partir de données de trafic comme:

- la longueur de stockage inadaptée au niveau de trafic des tourne-à-gauche,
- le phasage et les plans de feux,
- la capacité de stockage à l'intérieur du carrefour.

1.4. Présentation du carrefour à feux étudié

1.4.1 Configuration du carrefour étudié

La configuration étudiée est un carrefour constitué :

- d'une intersection de quatre routes principales, avec deux choix de direction : le premier est formé avec des mouvements de tourner à droite et d'aller tout droit (voies 2, 5, 8, 11), le deuxième est celui des mouvements de tourner à gauche (voies 1, 4, 7, 10),
- et quatre sorties de ce carrefour (voies 3, 6, 9, 12).

Un exemple de cette intersection signalisée est donné dans la Figure 1.4.

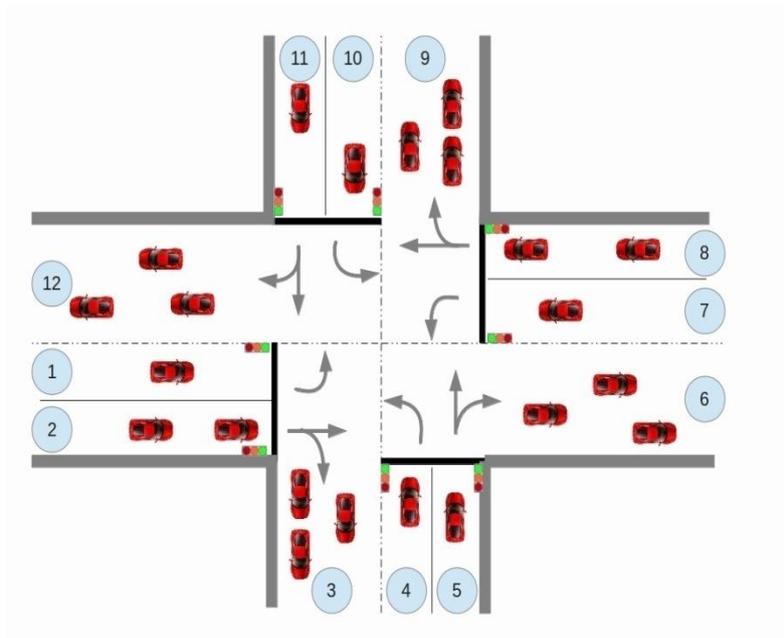


Figure 1. 4. Configuration du carrefour étudié

1.4.2 Caractéristiques du carrefour à feux étudié

Les carrefours sont les lieux de croisement d'au moins deux routes où un flux de véhicules venant d'une même origine se divise en deux ou plusieurs flux vers plusieurs destinations suivant des coefficients appelés taux des mouvements tournants. Un tel croisement peut revêtir de nombreuses formes. Une route est caractérisée par sa longueur et son nombre de voies ainsi que le sens de la circulation et la vitesse maximale autorisée sur les voies.

La figure 1.5 en montre les zones fonctionnelles.

Dans chaque intersection, nous pouvons identifier trois zones fonctionnelles :

- une zone de stockage, placée: en amont de la zone de conflit, constitue l'entrée empruntée par les véhicules ;
- une zone de conflit, relative à l'espace de croisement des routes ; i.e. la ressource critique partagée par tous les véhicules qui traversent l'intersection ;

- une zone de sortie, placée en aval de la zone de conflit, permet le soulagement de cette zone.

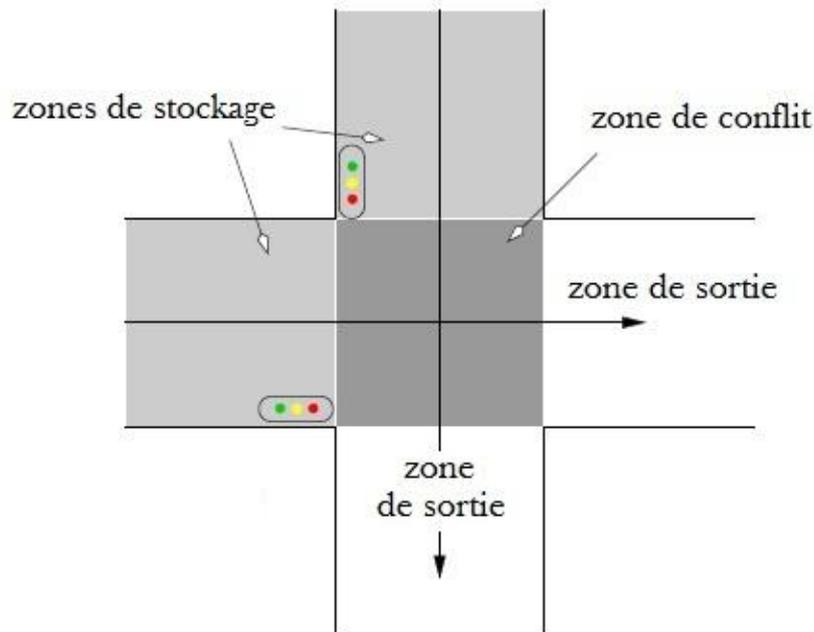


Figure 1. 5. Zone fonctionnelle d'un carrefour simple de deux routes à sens unique

Le caractère conventionnel de la signalisation lumineuse concerne les couleurs à utiliser mais également leur ordre de succession d'apparition. En effet, l'allumage des feux est séquentiel, c'est-à-dire astreint à une procédure ordonnée, en l'occurrence la séquence vert-jaune-rouge (Lannoy, 2001). Un vocabulaire technique commun, désignant le fonctionnement de la signalisation tricolore, est également utilisé par l'ensemble de la communauté des ingénieurs concernés par le domaine :

- l'état des feux : le signal lumineux commandant le passage libre (feu vert), toléré (feu orange) ou interdit (feu rouge) du trafic des véhicules ;
- une phase : la durée pendant laquelle un feu passe par les trois états, c'est-à-dire effectue une séquence de signal lumineux ;
- un cycle : la période pendant laquelle l'ensemble des feux effectuent leur phase permettant successivement l'admission de tous les courants de véhicules dans ce carrefour ;
- un plan de feux : la durée et l'ordre de déroulement de l'allumage des trois états, pendant un cycle, de l'ensemble des groupes de feux ; un même carrefour peut suivre alternativement plusieurs plans de feux.

1.4.3 Notion de conflit

Un point conflictuel résulte de la rencontre, en un même lieu, de mouvements antagonistes de mobiles. Il est nécessaire d'étudier, dans ce cas, le comportement de l'écoulement du trafic. En général, les flux de mouvements dans le carrefour sont séparés en groupes, recevant simultanément des signaux identiques. La zone de conflit d'un carrefour est constituée de l'ensemble de ses points conflictuels.

On peut distinguer trois types de conflits :

- *un conflit primaire* : issu du croisement de deux mouvements sécants; pour des raisons de sécurité, il est nécessaire de n'autoriser l'accès à un tel conflit qu'à un seul des mouvements concernés à la fois (points A et C de la figure 1.6).
- *un conflit secondaire* : issu de la rencontre des mouvements conflictuels seulement gênants : tourne à gauche ou tourne à droite rencontrant des piétons. Ce type de conflit est résolu par les règles du code de la route et pour des raisons de sécurité, il arrive que ces mouvements ne soient pas autorisés à accéder la zone de conflit simultanément (points B et D de la figure 1.6).
- *un conflit tertiaire* : dû à la géométrie d'un tronçon acceptant plusieurs modes, comme, par exemple, une voie étroite à double sens, ou, encore, une voie d'insertion trop courte (point E de la figure 1.6).

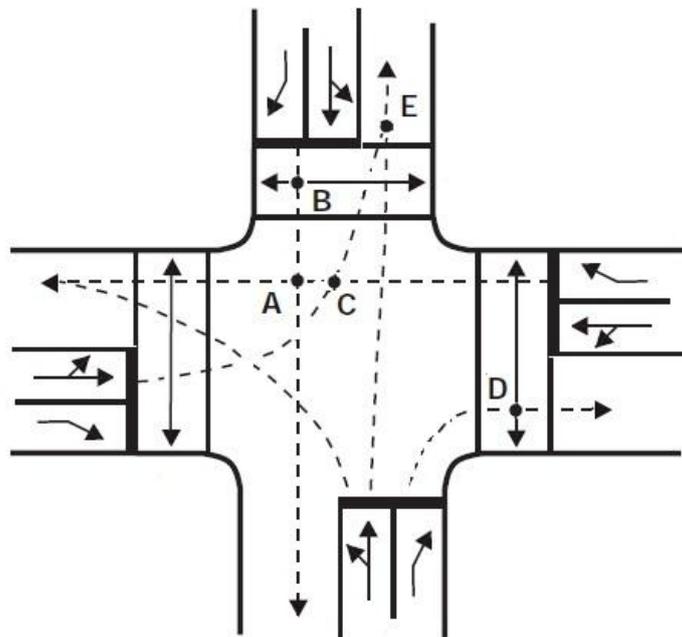


Figure 1. 6. Exemples de conflits dans un carrefour

1.4.4 Découpage en phases

Le découpage en phases, ou phasage, est un élément essentiel qui conditionne le bon fonctionnement d'un carrefour. Il doit :

- être optimisé en fonction des emprises disponibles et de la géométrie du carrefour, après une analyse aussi exhaustive que possible des différents mouvements,
- et faire apparaître toutes les phases du trafic, en particulier tourner à gauche.

Chaque phase est définie par sa propre capacité et par sa propre demande. La capacité est tributaire, d'une part, de l'espace ou du temps disponible pour l'écoulement du trafic et, d'autre part, du type de commande appliquée aux feux (Bell, 1997).

Comme nous l'avons déjà mentionné précédemment, un carrefour se compose d'un certain nombre de routes (ou directions) et d'une zone de conflits (l'intersection), chaque direction pouvant être utilisée par plusieurs flux de véhicules (Yan, 2008).

Afin d'éviter les conflits entre les différents flux, sont utilisées, fréquemment, les notions de *flux compatibles* et de *flux incompatibles*. Évidemment, quand les trajectoires de deux flux de trafic ne se croisent pas, ces flux peuvent obtenir l'autorisation de traverser le carrefour simultanément; nous qualifions ces deux flux de flux compatibles. Par exemple, dans la figure 1.7, le flux 1 et le flux 7 constituent deux flux compatibles. A l'inverse, lorsque les trajectoires des deux flux se croisent, les flux sont en conflit et par conséquent incompatibles (par exemple, les flux 1 et 8), et leur mouvement simultané ne doit donc pas être autorisé.

Dans notre cas, l'intersection étudiée est divisée en quatre Groupes de Flux (GF) compatibles, comme le montre sur la figure 1.6. GF1: Flux 1 et 7; GF2: flux 2 et 8; GF3: flux 5 et 11 et GF4: flux 4 et 10.

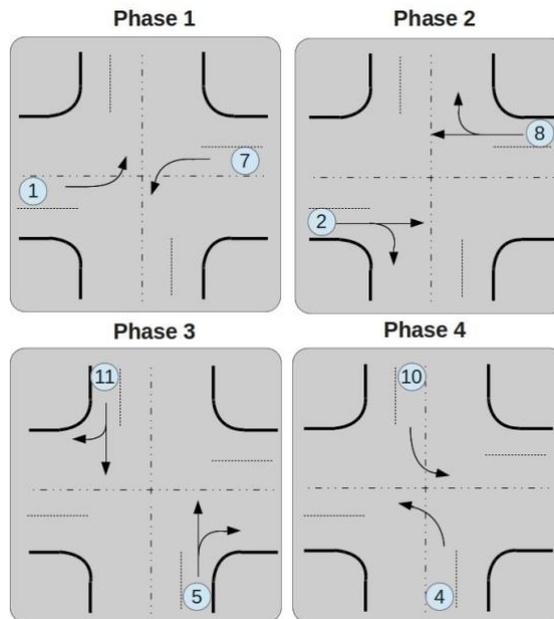


Figure 1. 7. Structure du carrefour à 4 phases

1.4.5 Paramètres nécessaires au calcul de la durée des feux

Ces paramètres sont très utiles pour la mise en œuvre des stratégies de commande. Leur évolution est considérée comme un facteur déterminant pour l'efficacité de telles stratégies (Tolba, 2004). Cependant, quelle que soit la méthode de commande appliquée à l'intersection, les indications des feux (vert, orange et rouge) doivent se succéder à l'intérieur d'un cycle défini comme étant la durée fixe ou variable, séparant deux passages successifs de l'ensemble des signaux par le même état (Cohen, 1990).

Définitions :

- *Vert effectif* : le temps de vert effectif est la somme du temps de vert réel et du temps de l'orange qui est souvent de 3 ou 5 secondes selon la vitesse d'approche dans le cas d'un carrefour ordinaire ;
- *Vert utile* : le temps de vert utile est la différence entre le temps de vert effectif et celui du temps perdu ;
- *Temps perdu* : la somme du temps perdu au début du vert et celui en fin de phase ;
- *Rouge utile* : obtenu en retranchant, de la durée du cycle, le temps du vert utile ;
- *Rouge intégral* : la durée pendant laquelle aucun véhicule n'est admis dans le carrefour, c'est-à-dire lorsque l'état est rouge sur chaque feu.

Dans un carrefour à feux, la signalisation tricolore peut être régie de trois manières différentes (Pierrick, 2010) :

- *la gestion 1* : un feu est vert et les autres sont rouges. Le changement d'état des feux est régulé par un temporisateur qui applique une durée de vert identique pour chaque voie. Ainsi, pour chaque voie, le feu est vert pendant un quart de cycle ;

- *la gestion 2* : deux feux opposés (Nord-Sud ou Est-Ouest) sont verts et les deux autres sont rouges. Le changement d'état des feux est régulé par un temporisateur qui applique une durée de vert identique pour chaque binôme de voies. Ainsi, pour chaque voie, le feu est vert pendant la moitié du cycle ;

- *la gestion 3* : deux feux opposés (Nord-Sud ou Est-Ouest) sont verts et les deux autres sont rouges. Le changement d'état des feux est régulé selon la circulation.

1.5. Les différentes stratégies de régulation via les feux de signalisation

Ce sont les stratégies les plus traitées dans la littérature et les plus utilisées sur le terrain. Un plan de feu d'un carrefour est déterminé par la spécification de quatre variables : la longueur du cycle, le plan de phase, la durée de chaque phase et enfin le décalage entre les phases.

Les stratégies de régulation en temps réel s'appuient généralement sur trois modules (Papageorgiou, 2006).

Le premier module est un module de collection et de traitement des mesures des variables du trafic. Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les variables du trafic comme, par exemple, les boucles magnétiques qui permettent de mesurer la densité, le flux et le nombre de véhicules dans un tronçon de route ; les caméras vidéos peuvent, en plus, évaluer la longueur de la file d'attente devant un feu de signalisation ; etc.

Le deuxième est généralement un module de prédiction qui s'appuie sur un modèle de trafic plus ou moins sophistiqué. À partir des variables mesurées, ce module prédit les valeurs futures de ces mêmes ou / et d'autres variables.

Le troisième module d'optimisation détermine enfin, les paramètres optimaux des plans de feux qui permettent de minimiser le temps de parcours d'un flux donné, les temps d'attente aux carrefours ou le nombre de voitures dans le réseau.

Chaque stratégie a ses propres variables mesurées, son propre module de prédiction et son propre module d'optimisation. Les stratégies diffèrent aussi par les approches de résolution exploitées (programmation dynamique, heuristiques, réseaux de neurones, etc) et même par la philosophie de l'approche (notion de cycle fixe, instants de basculement du vert au rouge, etc).

Dans la suite, nous allons étudier ces trois stratégies de régulation : la stratégie prédéterminée, la stratégie semi-adaptative et la stratégie adaptative.

1.5.1 Stratégie prédéterminée ou cyclique

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

Le rôle principal des plans de feux fixes est de mettre en marche cycliquement une série de phases pendant des durées données. Cette série de phases doit permettre de mieux répondre à la demande moyenne de la capacité estimée du carrefour.

Dès le début des années 1980, deux systèmes de gestion du trafic ont émergé. Il s'agit de SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique) et SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System).

Le premier, développé au Royaume Uni par Hunt dans (Hunt, 1982), détermine, au niveau de la régulation, la durée optimale du cycle commune à tous les carrefours. L'algorithme correspondant élaboré, TRANSYT, se base sur une conception de plans de feux de circulation, définis de façon à favoriser les transports en commun sans détection individuelle de ses véhicules. Il fournit un plan optimal du point de vue des durées de feu vert et de leurs décalages et minimise un indicateur s'appuyant, entre autres, sur le temps du trajet global et sur le nombre d'arrêts. Le choix de la durée du cycle doit être effectué entre les différents plans disponibles au poste de commande selon la situation du trafic ; l'exécution se réalise manuellement par un opérateur lorsqu'il détecte un événement exceptionnel nécessitant une gestion adaptée au réseau. Des tests ont été réalisés pour comparer SCOOT à l'algorithme antérieur TRANSYT. Une économie moyenne de 12% a été réalisée aussi sur les retards (Langlais, 2008).

Le second, SCATS, proposé en 1982 en Australie par Lowrie dans (Lowrie, 1982), a la particularité de résider en l'existence de deux niveaux : un niveau stratégique et un niveau

tactique. Le premier stratégique détermine les plans de feux adéquats pour tout le réseau considéré, alors que le deuxième, tactique, agit au niveau local du carrefour, tout en respectant les contraintes établies par le niveau stratégique.

1.5.2 Stratégie semi-adaptative ou acyclique

Cette famille de stratégies de régulation ne considère pas explicitement la notion de cycles, de décalages ou de durées des phases de vert. Les successions de phases de vert et de rouge sont perçues comme des instants de commutation. La durée du cycle ainsi que les durées du feu vert peuvent varier d'un cycle à un autre en fonction de la demande. L'algorithme, dit CRONOS (ContRol Of Networks by Optimization of Switchovers) (Boillot, 1992), entrant dans le cadre de la micro-régulation se basant essentiellement sur les plans de feux fixes, ajuste les durées de commutation d'un cycle à un autre, en fonction de la demande enregistrée en amont.

Il s'agit d'un algorithme de régulation du trafic urbain par commande des feux en temps réel. Pour recevoir une information riche, CRONOS utilise un traitement automatique d'images vidéo. Développé dans les années 90 par l'INRETS (Institut Nationale de Recherche sur les Transports et leur Sécurité), cet algorithme a été intégré au système «Carrefour Intelligent» qui rassemble des fonctions de gestion des carrefours régis par des feux tricolores (Boillot, 2002).

CRONOS est basé sur quatre principes :

- la minimisation du retard total sur un carrefour sur une minute ;
- la régulation de zones avec un souci de cohérence, en n'utilisant que les mesures de débits aux limites de la zone ;
- l'algorithme acyclique sans phase de trafic définie à priori. Le carrefour est défini comme un ensemble de contraintes de sécurité sur les feux. Une solution satisfaisant ces contraintes constitue une solution possible de l'algorithme ;
- les mesures de trafic par traitement d'images vidéos, pour obtenir de meilleures informations que les boucles magnétiques, les longueurs des files d'attente étant mesurées directement.

CRONOS possède, de plus, trois fonctions principales :

- le module de prévision prédit les futures arrivées de véhicules sur les entrées de la zone et permet au module de simulation de connaître la future demande arrivant dans la zone ;

- le module de simulation calcule le critère de trafic à optimiser pour chaque configuration de feux testée ;

- le module d'optimisation recherche la commutation optimale de tous les feux pour minimiser le critère de gestion du trafic choisi.

1.5.3 Stratégie adaptative ou temps réel

La recherche actuelle s'est orientée vers la réalisation de systèmes de régulation qui tiennent compte de l'évolution du trafic au cours du temps et qui réagissent en temps réel. C'est dans cet esprit que plusieurs types de méthode ont été élaborés pour ce mode de régulation, comme PRODYN (Henry, 1983b).

L'innovation de la méthode PRODYN est de ne pas pré-déterminer le cycle et de réadapter constamment sa durée dans le temps et à chaque carrefour. Le calcul des paramètres (cycles et phases) est remplacé par un processus de décision visant à déterminer s'il faut conserver les feux d'un carrefour dans leur état ou de les faire évoluer dans un autre état. Cette décision, prise toutes les 2 à 5 secondes, doit permettre de définir une séquence optimale de commandes dans le temps. Le critère d'optimisation est la minimisation des temps d'attente des véhicules circulant dans la zone. La méthode PRODYN a donc une capacité à définir, à chaque instant, l'évolution du trafic et peut s'appliquer aussi bien à des carrefours isolés qu'à des carrefours coordonnés au sein d'une zone définie.

Dans le cas d'un réseau de carrefours, la coordination s'obtient soit grâce à un échange convenable d'informations entre carrefours adjacents (PRODYN décentralisé), soit par une coordination mathématique (PRODYN hiérarchisé).

Dans le premier cas, le carrefour amont, ayant prédit la séquence de ses sorties, communique celle-ci au carrefour aval qui optimise comme lorsqu'il est isolé.

Dans le second cas, un coordinateur fait optimiser chaque carrefour, recueille le résultat de cette optimisation et assure le meilleur compromis pour la commande du réseau après quelques itérations.

1.6. Gestion de feux de carrefours – Position du problème

Les grandes villes possèdent un système de régulation du trafic permettant de gérer la circulation par une gestion des feux tricolores. La régulation du trafic se fait, en effet, par une adaptation permanente du fonctionnement des feux tricolores, aux conditions réelles de circulation.

Compte tenu de la complexité de l'implémentation des systèmes de régulation du trafic, il n'existe pas de méthode parfaite pour contrôler le flux dans une intersection routière (Motawej, 2010). L'adéquation d'une méthode envisageable doit donc être très liée à la condition du trafic qu'il soit fluide, dense ou saturé.

Les recherches, qui ont été menées sur la régulation du trafic, ont permis de développer plusieurs stratégies de régulation dont la stratégie prédéterminée, la stratégie semi-adaptative et la stratégie adaptative. Ces stratégies utilisent des méthodes d'optimisation en ligne afin de minimiser un critère formulé à partir d'un comportement souhaité. Celles-ci présentent, toutefois, les inconvénients suivants:

- les contrôleurs de régulation, basés sur les plans de feux fixes, atteignent rapidement leurs limites car il existe un grand écart entre la demande estimée dans le calcul des plans et la demande réelle mesurée sur terrain,
- ces stratégies ne s'adaptent pas, de manière efficace, aux variations permanentes du trafic car le contrôle d'un tel trafic nécessitant un degré important d'adaptabilité pour répondre à une demande très fluctuante, dans de très courts délais,
- en période de congestion, toutes ces stratégies sortent de leur domaine de validité. De multiples expériences visant à comparer, en situation saturée, l'efficacité de ces méthodes révèlent de faibles écarts entre ces approches (Chen, 2007).

Nos travaux, consignés dans ce mémoire, rentrent dans le cadre de la résolution de tels problèmes, nécessitant l'élaboration de nouvelles méthodes de régulation du trafic urbain. Nous avons opté pour le choix d'un modèle adapté au fonctionnement du carrefour qui présente, à la fois, une dynamique continue et une évolution suivant une loi discrète. Il est envisagé, de plus, de considérer la réduction de la complexité d'un tel fonctionnement, hybride, par utilisation de l'approche multimodèle, tout en optimisant le temps d'évacuation des véhicules et les temps d'attente au carrefour étudié.

Conclusion

La régulation du trafic est un domaine vaste dans lequel plusieurs techniques et formes de signalisation sont utilisés pour faciliter la circulation des véhicules, augmenter la sécurité des usagers, réduire toute sorte de nuisances et rationaliser l'exploitation des infrastructures routières. Parmi les sujets les plus importants de la régulation du trafic, nous trouvons la gestion des carrefours à feux. Ces derniers constituent un terrain sensible pour les conflits de trafic et représentent un espace de convergence de différents acteurs du transport.

Dans ce premier chapitre, nous nous sommes intéressés à la théorie du trafic urbain qui a donné naissance à plusieurs modèles pour l'étude et l'analyse du comportement et des phénomènes qui régissent son écoulement à différents niveaux de détails. Deux classes principales de modèles ont été développées dans la littérature. La première repose sur des considérations microscopiques et s'intéresse aux véhicules individuels et ses interactions avec son environnement et la deuxième, non considérée dans nos travaux, s'intéresse au mouvement du flux considéré d'un point de vue macroscopique.

Les recherches, menées sur la modélisation du trafic, ont permis de développer plusieurs modèles. Toutefois, la plupart d'entre eux sont destinés, de manière exclusive, au trafic soit urbain soit autoroutier. En outre, les modèles, proposés jusqu'à présent, ne décrivent le trafic que du point de vue macroscopique ou microscopique. La recherche d'un processus de trafic intégrant ces deux orientations, comportements et modélisation, nécessite le développement de techniques avancées relevant de la modélisation des systèmes hybrides.

Le chapitre suivant, est consacré à la classe particulière de carrefours à flux continus, vus comme systèmes dynamiques hybrides, qui présentent la particularité de comporter une dynamique continue linéaire et positive, gérée par une dynamique discrète.

Chapitre 2

**Modélisation par réseaux de Petri hybrides
proposée pour le trafic dans les
intersections**

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la modélisation du trafic, une étape incontournable pour l'étude de la circulation du trafic, est caractérisée par plusieurs types de comportement, continu sur les autoroutes et discret au niveau des intersections à feux. L'exploitation des réseaux de Petri, comme outil de modélisation dans ce domaine, est récente. Les travaux correspondants sont articulés principalement autour de l'utilisation de logiciels de simulation en proposant, notamment, des approches pour le contrôle des feux de signalisation (Wang, 1993), (Tolba, 2004).

Dans le but d'estimer les caractéristiques du trafic, nous introduisons, dans ce chapitre, d'abord les notions fondamentales relatives aux réseaux de Petri.

Pendant longtemps l'automatique a traité séparément les systèmes continus et les systèmes à événements discrets. Pour chacune de ces deux classes de systèmes, existe des méthodes et des outils pour résoudre les problèmes qui se posent à elle. Cependant, la séparation entre ces approches, continue et discrète, n'est pas aussi nette compte tenu que la plupart des systèmes réels présentent à la fois des aspects continus et d'autres discrets.

Dans le but d'estimer les caractéristiques moyennes du trafic telles que le débit et la densité, nous proposons, dans ce chapitre, un modèle macroscopique basé sur les réseaux de Petri Hybrides (RdPH).

Compte tenu du fait que le modèle RdP hybride est non linéaire, nous avons été amenés à le décomposer en un ensemble de systèmes d'équations différentielles linéaires par phase assurant aussi la voie à la mise en œuvre d'approches multimodèle pour la régulation du trafic urbain (Tolba, 2004).

2.1. Notions de base sur les réseaux de Petri (RdPs)

Les réseaux de Petri, introduits par Carl Adam Petri en 1962, offrent un compromis entre la modélisation et la visualisation graphique de la dynamique des systèmes à événements discrets.

Ils constituent aujourd'hui l'un des outils de modélisation et d'évaluation des performances le plus puissant et le plus étudié dans la littérature (Murata, 1989), (David, 1992). Les chercheurs ont fait appel à un outil issu de la théorie des systèmes à événements

discrets, entre autres les réseaux de Pétri (RdPs) (Wang, 1993), (Heidemann, 1996) compte tenu que leur formalisme, à la fois graphique et mathématique, permet de modéliser finement divers phénomènes notamment la synchronisation, le parallélisme, le partage de ressources et les situations des conflits.

2.1.1 Choix des RdPs comme outil de modélisation

Rappelons qu'un modèle, constituant une vue partielle, plus ou moins abstraite de la réalité afin de l'appréhender plus simplement, est établi en fonction des objectifs, du jugement, de la nature et de la qualité des informations dont dispose le concepteur. Il peut être formulé par exploitation de notions mathématiques, de symboles, de mots,... (Sammoud, 2014).

Les outils de modélisation les plus utilisés dans le domaine du trafic routier que nous allons présenter, possèdent chacun ses propres avantages et inconvénients.

➤ Un automate est une machine à états qui permet de décrire le fonctionnement entrées/sorties d'un système à événements discrets. Il est représenté par une succession d'états et de transitions qui sont associées à des événements.

➤ Les réseaux de Petri (RdPs), qu'ils soient ordinaires, généralisés, colorés, temporisés, temporels ou stochastiques, sont des outils graphiques à support mathématique permettant de modéliser, de visualiser et d'analyser des évolutions comportant du parallélisme, de la synchronisation et du partage de ressources (Brams, 1983) (Murata, 1989) (David, 2010).

➤ Le langage GRAFCET (Grphe Fonctionnel de Commandes Etapes Transitions) introduit en 1977 est un langage graphique permettant de définir le comportement séquentiel d'un système automatisé à partir de la connaissance des actions à entreprendre. Ces actions sont associées, d'une part, à des variables de sorties et à des événements pouvant permettre le passage d'une situation à une autre et, d'autre part, à des variables d'entrée.

Il est à remarquer, par ailleurs, que les représentations graphiques telles que le GRAFCET sont de plus en plus privilégiées par rapport aux représentations littérales et algébriques, du fait de leur aptitude à servir de support de communication entre tous les intervenants.

Le GRAFCET est mieux adapté à la programmation d'un automate directement en interaction avec les capteurs et les actionneurs (commande locale) que des systèmes à événements discrets. Si les automates ne peuvent pas représenter, de manière explicite les structures de synchronisation, les RdPs sont reconnus comme étant un outil très puissant de modélisation des synchronisations, des parallélismes, des conflits et des partages de ressources.

Le modèle de base des Réseaux de Petri (qualifiés d'Autonomes (RdPAs)) permet d'étudier les propriétés logiques des systèmes, c'est-à-dire les propriétés qui dépendent de l'ordre des événements, mais sans référence aux instants où ils arrivent.

Depuis la création des RdPAs (Brams, 1983), de nombreuses extensions ont été apportées. Ces extensions ont été effectuées soit pour améliorer la concision du modèle comme les Réseaux de Petri Colorés (Dotoli, 2004), soit pour augmenter la puissance de spécification de cet outil comme les Réseaux de Pétri Temporisés, les Réseaux de Petri Continus (Tolba, 2004) et les Réseaux de Petri Hybrides (Di-Febrarro, 2004) que nous envisageons d'exploiter dans la suite.

2.1.2 Idée de base sur le choix des RdPs hybrides

Un carrefour est un système dynamique hybride tel que l'évolution des variables continues (flux de voitures sur les voies) est périodiquement interrompue par les séquences de commutations des feux (événements discrets) (Derai, 2014). Les variables continues n'influent pas directement sur l'état des variables discrètes, c'est plutôt l'état des variables discrètes (états des feux) qui conditionne l'évolution de la dynamique continue (le flux est interrompu par l'état rouge du feu, et libéré quand le feu est vert). De tels systèmes peuvent être modélisés par des RdPs Hybrides relatifs, chacun, à une combinaison d'un RdP T-temporel et d'un RdP continu à vitesse constante. Avant de présenter ces modèles hybrides, nous envisageons de définir d'abord les RdPs Autonomes, puis les RdPs T-temporels et enfin les RdPs Continus à Vitesse Variable (RdPCV).

2.1.2.1 Les RdPs Autonomes

Un réseau de Petri (RdP) est un graphe biparti constitué de places, de transitions et d'arcs orientés qui relient les transitions aux places et les places aux transitions. Il est représenté par un quintuplet $Q = \langle P, T, Pre, Post, M_0 \rangle$ avec :

P : ensemble fini de L places $P = \{P_1, P_2, \dots, P_L\}$, $L \geq 0$,

T : ensemble fini de n transitions $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$, $n \geq 0$,

$P \cap T = \emptyset$: i.e. les ensembles P et T sont disjoints,

$Pré$: application de $P \times T$ dans N correspondant aux arcs directs reliant les places aux transitions,

$Post$: application de $P \times T$ dans N correspondant aux arcs directs liant les transitions aux places.

Lorsque $Pré$ et $Post$ prennent leurs valeurs dans la paire $\{0,1\}$, le réseau est dit ordinaire.

N est l'ensemble des entiers naturels et M_0 est le vecteur de marquage initial dans lequel chaque place du RdP peut contenir k jetons, k étant un entier positif ou nul.

L'évolution d'un RdP, c'est à dire la transition entre deux marquages, suit la règle suivante : le modèle peut effectuer la transition d'un marquage au suivant lorsque toutes les conditions relatives à cette transition sont remplies.

Les transitions dans un RdP modélisent les événements dont l'occurrence change l'état du système et chaque état est modélisé par un marquage particulier du RdP. Ce marquage change chaque fois qu'une transition est franchie, le franchissement d'une transition étant conditionnée par sa validation.

Les définitions de la validation, du franchissement d'une transition et l'ensemble de marquages accessibles sont formulées ci-dessous.

Une transition T_j est dite validée par le marquage M , si ce marquage satisfait les conditions suivantes :

$$\forall P_i \in T_j, \frac{m_i}{Pré(P_i, T_j)} > 0 \quad (2.1)$$

La transition T_j est dite q validée par le marquage M , lorsqu'elle a la possibilité d'être franchie β fois d'un seul coup, ($\beta \leq q$) et si on a :

$$\forall P_i \in T_j, \min\left(\frac{m_i}{\text{Pr } \acute{e}(P_i, T_i)}\right) = q \quad (2.2)$$

q étant un entier positif, appelé degré de validation de la transition T_j .

Formellement, la dynamique d'un RdP autonome est définie par l'équation fondamentale suivante :

$$M = M_0 + W S \quad (2.3)$$

où $S = [s_1, \dots, s_n]^T$ désigne le vecteur caractéristique, de dimension n , de la séquence de franchissement S réalisable à partir du marquage initial M_0 , et W la matrice d'incidence (de dimension $m \times n$) définie telle que :

$$W = [W_{ij}]$$

$$W_{ij} = \text{Post}(P_i, T_j) - \text{Pr } \acute{e}(P_i, T_j) \quad (2.4)$$

Lorsque la commande du RdP Autonome est élaborée, plusieurs problèmes relatifs à la gestion du temps, restent à résoudre dont ceux relatifs à l'évaluation des performances, à la modélisation des contraintes temporelles, à la synthèse d'une commande temporelle (c'est-à-dire le réglage des instants des tirs des transitions) et à la vérification du respect des contraintes. Les outils permettant de traiter ces questions font l'objet de la section qui va suivre.

2.1.2.2 Les RdPs Temporisés

Pour les RdPAs, aucune durée n'est liée au franchissement des transitions et/ou au temps de séjour des marques dans les places.

Cependant, il y a beaucoup de systèmes à événements discrets dont l'évolution dépend du temps qui est capitale surtout lorsque l'on veut évaluer les performances ou étudier les problèmes d'ordonnement d'un système dynamique (Murata, 1989). La nécessité de modéliser et d'étudier de tels systèmes a donné naissance aux RdPs Temporisés (RdPTs). La temporisation, indiquant la durée entre le début et la fin d'une opération, peut être associée soit aux places soit aux transitions. Il en résulte alors deux types de RdPs Temporisés : RdPs P-Temporisés et les RdPs T-Temporisés (Sifakis, 1977), voir (David, 1992).

Un RdPT est un doublet $\langle Q, Tempo \rangle$ tel que :

- Q est un RdP ordinaire marqué,
- $Tempo$ est une application de l'ensemble T des transitions dans l'ensemble des réels rationnels.

La sémantique de l'application $Tempo$ est que les transitions doivent rester dans la place T_j au moins pendant la durée d_j associée à cette transition :

$$Tempo(T_j) = d_j \quad (2.5)$$

La résolution des conflits pouvant se produire consiste à définir des priorités en fonction des temporisations. En effet, l'introduction des durées d_j permet de gérer la priorité de franchissement des transitions de sortie de la place P_i , l'ordre de franchissement étant donné à la transition de temporisation minimale / maximale.

Une transition T_j , d'intervalle temporel $[\alpha_j, \beta_j]$, peut être franchie à un instant t si et seulement si on a : $t \in [\theta + \alpha_j, \theta + \beta_j]$, θ représentant l'instant où le marquage a validé la transition T_j correspondant à l'instant du dernier franchissement de celle-ci. Un des problèmes posés par l'analyse des RdPs T est la gestion simultanée de plusieurs validations.

2.1.2.3 RdPs Continus à Vitesses variables (RdPCV)

Les RdPs continus ont été définis, par David et Alla (David, 1992), comme une limite des RdPs discrets, obtenus à partir de ces derniers en fluidifiant les marques.

Une place d'un RdP continu est dite place continue ou C-place. Contrairement aux RdPs ordinaires, temporisés, le nombre de marques est un nombre réel positif ou nul.

De même, une transition dans un RdP continu est dite transition continue, ou C-transition, validée si toutes ses places d'entrée sont marquées alors que, pour les RdPs discrets, le franchissement d'une transition est un événement instantané. Il s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse, correspondante au nombre de marques franchies, pendant une unité de temps.

Les RdPs continus sont des outils de modélisation des systèmes dynamiques pour lesquels toutes les variables d'état sont continues et positives. Dans ce cadre, plusieurs extensions des RdPs continus ont été proposées, comme les RdPs à vitesses constantes et les RdPs à vitesses variables (David, 1992).

Dans notre travail, nous allons nous intéresser uniquement aux RdPs à vitesses variables (RdPCV) qui est, d'une manière formelle, un doublet $\langle Q, X_{\max} \rangle$ tel que :

- Q est un RdP ordinaire marqué, $X_{\max} \in \mathbb{R}^{+n}$, tel que :
- X_{\max} est un vecteur constitué des vitesses de franchissement maximales des transitions du réseau,

$$X_{\max} = \{x_{\max j}\} \in \mathbb{R}^{+n} \text{ avec : } x_{\max j} = \frac{1}{d_j}, \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.6)$$

L'évolution du marquage d'un RdPCV est régie par le système d'équations différentielles suivant :

$$\frac{dM(t)}{dt} = W X(t) \quad (2.7)$$

Le vecteur de marquage $M(t + \Delta t)$, à l'instant $t + \Delta t$, constitué par des réels positifs, dépend du vecteur des vitesses de franchissement des transitions $X(t) = \{x_j(t)\} \in \mathbb{R}^{+n}$ et du vecteur de marquage à l'instant t : $M(t) = \{m_i(t)\} \in \mathbb{R}^{+L}$.

Les composantes x_j du vecteur vitesses de franchissement $X(t)$ dépendent continuellement du marquage du RdPCV selon la relation suivante :

$$x_j(t) = x_{\max j} \cdot \min_{P_i \in T_j}(\alpha_j, m_i(t)) \quad (2.8)$$

α_j et T_j étant respectivement le nombre de franchissements simultanés de la transition T_j et l'ensemble de ses places d'entrée.

Ce modèle fournit une bonne approximation d'un RdP discret, en particulier lorsque le nombre de marques est faible, mais les simulations étant toutefois plus longues.

2.1.2.4 Les RdPs Hybrides

Les réseaux de Petri continus sont adaptés à la modélisation d'un système à flux continu mais ne permettent pas de représenter l'influence des conditions logiques sur ce flux.

Considérons le cas du trafic routier et le transfert de véhicules à travers les voies à deux états ; si le feu est vert, le débit est traduit par une vitesse de franchissement d'une transition $x(t)$, et si le feu est rouge, la vitesse correspondante devient nulle. Ce comportement est équivalent à avoir brusquement un autre RdP continu, ou bien à faire varier la vitesse de franchissement d'une transition dans un réseau de Petri continu à vitesse fonction du temps. Les RdPs hybrides (David, 2010), contenant des nœuds discrets, des D-places et des D-transitions et des nœuds continus, des C-places et des C-transitions, permettent de représenter, au sein d'un même formalisme, le couplage entre un fonctionnement continu et un fonctionnement logique. Ils offrent une représentation graphique unifiée des variables continues et des variables discrètes.

Un réseau de Pétri hybride autonome marqué est un sextuplet $R = \langle P, T, Pre, Post, m_0, h \rangle$ respectant les notations suivantes :

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ est un ensemble fini et non vide de places ;

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ est un ensemble fini et non vide de transitions;

$P \cap T = \emptyset$, i.e. les ensembles P et T sont disjoints;

$h: P \times T \rightarrow \{D, C\}$, appelée fonction hybride, elle indique pour chaque nœud s'il est discret (PD et TD) ou continu (PC et TC);

L'application d'incidence d'entrée, $Pre: P \times T \rightarrow Q^+$ ou N ;

L'application d'incidence de sortie, $Post: P \times T \rightarrow Q^+$ ou N ;

Le marquage initial, $m_0: P \rightarrow R^+$ ou N ;

N étant l'ensemble des entiers naturels.

Dans la définition de $Pre, Post$, et m_0 , N correspond au cas où P_i est dans PD, et Q^+ ou R^+ correspond au cas où P_i est dans PC.

Les fonctions *Pre* et *Post* doivent satisfaire le critère suivant : Si P_i et T_j sont tels que P_i est dans PD et T_j est dans TC, alors $Pre(P_i, T_j) = Post(P_i, T_j)$ doit être vérifiée.

Un réseau de Pétri hybride non marqué est un 5-uplets $Q = \langle P, T, Pre, Post, h \rangle$, i.e., en plus de la structure, la nature de chaque nœud (discret ou continu) est spécifié dans Q.

Dans un réseau de Pétri continu, le taux de franchissement d'une transition T_j pour un marquage m , est défini par:

$$enab(T_j, m) = \min_{P_i \in T_j} \left(\frac{m(P_i)}{Pre(P_i, T_j)} \right) \quad (2.9)$$

Dans un réseau de Pétri hybride, une transition discrète est dite franchissable si chaque place P_i dans T_j satisfait la condition suivante:

$$m(P_i) \geq Pre(P_i, T_j) \quad (2.10)$$

Les réseaux de Pétri hybrides ont été appliqués d'abord à la modélisation, à l'évaluation des performances et à la conception des systèmes de fabrication (Bail, 1991). Récemment, ils ont également été utilisés pour étudier les systèmes de transport, (Jbira, 2011).

L'introduction du facteur temporel pour commander les carrefours à feux, lors de l'étude, nécessite donc l'utilisation d'un RdP Hybride (RdPH) en particulier.

En effet, la commande d'un carrefour à feu consiste à utiliser des contrôleurs hybrides ayant des sorties continues et la capacité de prendre des décisions discrètes, conformément à certains objectifs de performance et de sûreté du procédé du carrefour commandé. Une partie des approches de la commande des carrefours est basée sur le principe de recherche d'une stratégie discrète qui permet de restreindre le comportement du système pour satisfaire certaines spécifications imposées.

2.2. Modélisation du carrefour étudié

Dans cette partie, nous présentons le modèle Réseaux de Pétri à Vitesse Continue (RdPCV) de l'écoulement du trafic discrétisé dans l'espace. Avant d'aborder la méthode de modélisation du trafic, nous envisageons de rappeler les principes de base d'un tel réseau.

2.2.1 Description d'une route

Le système étudié est une section de route dont les voies parallèles ont des propriétés identiques. Les véhicules sont supposés distribués de façon homogène entre les voies d'une section et le premier véhicule entré dans chaque section est aussi le premier véhicule à la quitter (Corréia, 2007)

Nous pouvons considérer que chaque voie est divisée en N segments $[x_i, x_{i+1}]$ de longueur Δ_i tel qu'indiqué dans la figure 2.1 et supposer que, pour chaque segment, les variables caractéristiques de l'écoulement (densité, débit, vitesse) ne dépendent que du temps et non de la position (Di-Febraro, 2004). En effet, une fois le modèle d'un segment défini, il est possible de l'étendre par concaténation, afin de traiter la route complète.

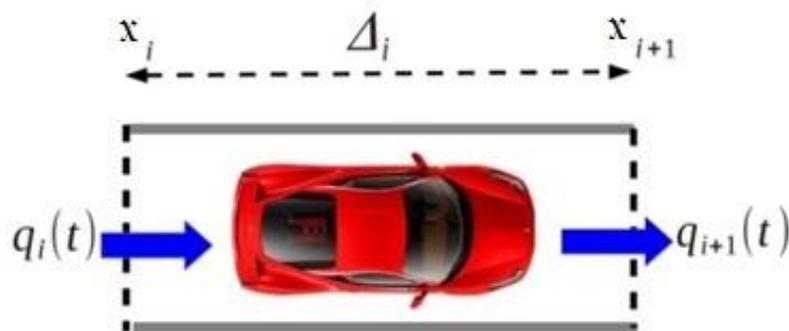


Figure 2. 1. Caractéristique d'une section de route générique

Par souci de simplicité, nous nous plaçons dans le cas des routes qui ne comportent aucun flux d'entrée ou de sortie secondaire.

2.2.2. Modélisation d'une section de route et évolution d'un RdPCV

Compte tenu du nombre de ses dynamiques, la modélisation d'un système physique par un RdP discret nécessite un nombre de marquages accessibles très grand. Les RdPs continus ont été introduits pour éviter cette explosion combinatoire du nombre d'états accessibles. Cette extension des RdPs permet, par ailleurs, d'élargir le cadre des RdPs aux systèmes qui ne sont pas modélisables par des RdPs ordinaires (tels que l'écoulement d'un fluide dans un réservoir, la production des produits par lot). Contrairement aux RdPs ordinaires ou temporisés (David et Alla, 1992), le nombre de marques dans les RdPs continus est un nombre réel positif. Le franchissement s'effectue comme un flot continu en introduisant la notion de vitesse traduite par le nombre de marques franchies pendant une unité de temps. Le

franchissement d'une transition dans les RdPs continus suit, dans le cas général, la loi régissant la dynamique du système étudié.

Dans ce qui suit, nous présentons le modèle RdPCV permettant de modéliser l'écoulement du trafic dans une section de route. Chaque section i du carrefour étudié est représentée par une place P_i . L'écoulement du flot de véhicules, d'une section i à une section $i+1$, est représenté par la transition T_{i+1} , figure 2.2. Le marquage $m_i(t)$ de la place P_i représente le nombre de véhicules présents sur la section i . La vitesse de franchissement $x_i(t)$ de la transition T_i respectivement $x_{i+1}(t)$ de la transition T_{i+1} représentent les débits $q_i(t)$ et $q_{i+1}(t)$.

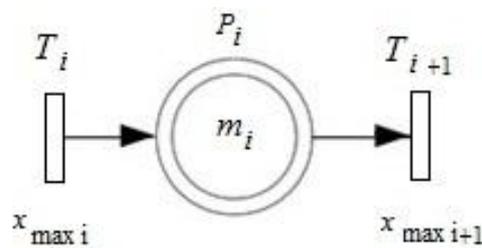


Figure 2. 2. Modélisation d'une section de la route

Notre objectif étant de parvenir à approcher le comportement d'un flot de véhicules en utilisant le modèle de RdPCV de la figure 2.2, il s'avère, nécessaire de lui rajouter des places supplémentaires associées à la transition T_i qui permet de limiter le nombre de franchissements simultanés de T_i ; car la vitesse de franchissement dépend non seulement du marquage de la place P_{i-1} en amont (i.e. le nombre de véhicules présents en amont) mais aussi du nombre d'emplacements disponibles dans le segment en aval.

Le réseau de la figure 2.3 est composé de 4 places continues (P_i , P'_i , P_j et P_{j+1}) et 2 transitions continues T_i et T_{i+1} . Le marquage m_i de la place P_i continue (représentée par un double cercle) décrit le nombre de véhicules qui entrent dans l'intersection. Chaque place P_i est associée à une place P'_i continue pour représenter la limitation de capacité de la place P_i qui traduit aussi la limitation de capacité sur la section de voirie considérée. Le nombre d'emplacements non occupés sur une section du carrefour est représenté par le marquage m'_i de la place P'_i . Le nombre moyen de véhicules, pouvant entrer ou traverser simultanément le carrefour, est représenté par le marquage a_j de la place P_j .

De plus, un réseau de Pétri discret (non représenté dans la figure 2.3) est utilisé pour représenter les phases de feux de signalisation.

L'entrée de chaque section est modélisée par une transition T_i (représentée par un rectangle) dont la fréquence de franchissement maximale q_{\max}^i est définie, en fonction du temps d'arrivée moyen d'un véhicule sur la voie θ_{in} , par :

$$q_{\max}^i = 1/\theta_{in} \quad (2.11)$$

De même, la sortie d'une section est modélisée par une transition T_{i+1} dont la fréquence maximale de franchissement q_{\max}^{i+1} est l'inverse du temps moyen θ_{out} nécessaire pour qu'un véhicule traverse la section :

$$q_{\max}^{i+1} = 1/\theta_{out} \quad (2.12)$$

Les significations des paramètres $i, m_i, m'_i, c_i, a_j, et a_{j+1}$ sont consignées dans le tableau 2.1.

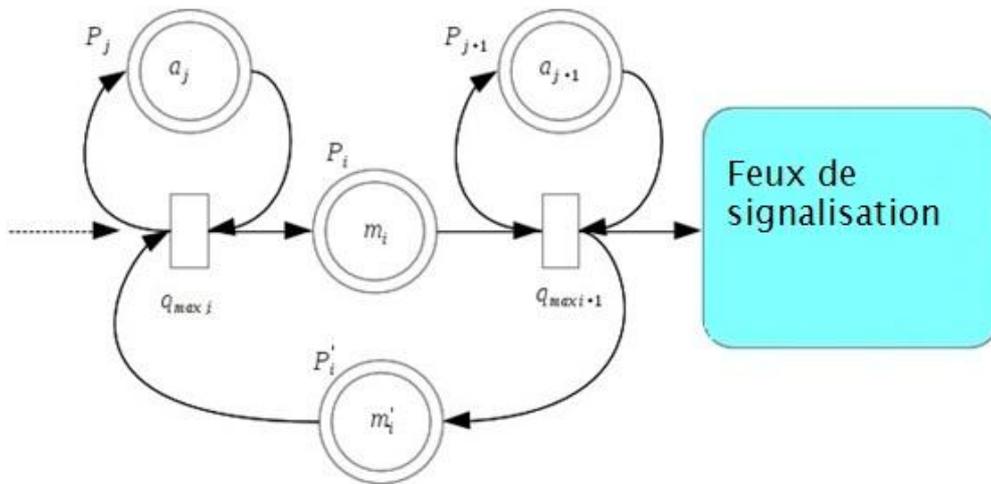


Figure 2. 3. Gestion du trafic dans une section de route

Tableau 2. 1. Les paramètres et leurs significations

Paramètre	Signification
i	voie i du carrefour
$m_i(t)$	nombre de véhicules présents sur la voie i à l'instant t
$m'_i(t)$	nombre d'emplacements disponibles sur la voie i à l'instant t
c_i	capacité de l'ième voie
$a_j et a_{j+1}$	nombre de franchissements simultanés des transitions $T_j et T_{j+1}$

Il convient de remarquer que la somme des marquages des places P_i et P'_i (i.e. $m_i + m'_i$) est un invariant de marquage. Il en est de même pour le marquage des places P_j (i.e. m_j) qui reste constant au cours du temps :

$$\begin{cases} m_i + m'_i = c_i & \forall t > 0, i=1, \dots, 8 \\ m_j = a_j & j=1, \dots, 16 \end{cases} \quad (2.13)$$

avec

a_j et c_i étant des constantes,

i : est le nombre de voie du carrefour étudié, figure 1.4, paragraphe 1.4.1 du 1^{ier} chapitre,

j : est le nombre de franchissement à l'entrée et à la sortie de chaque voie.

Conformément au principe d'évolution d'un RdPCV (David et Alla, 1992), les vitesses de franchissement $q_i(t)$ et $q_{i+1}(t)$ des transitions T_i et T_{i+1} ont pour expressions mathématiques:

$$\begin{cases} q_i(t) = q_{\max i} \min(a_j, m'_i(t)) \\ \quad = q_{\max i} \min(a_j, c_i - m_i(t)) \\ q_{i+1}(t) = q_{\max i+1} \min(a_{j+1}, m_i(t)) \end{cases} \quad (2.14)$$

Lorsque les conditions de validation des transitions T_i et T_{i+1} sont remplies (i.e., arrivée et départ de véhicules), l'évolution du marquage $m_i(t)$ de la place P_i est régie par l'équation différentielle continue suivante :

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = q_i(t) - q_{i+1}(t) \quad (2.15)$$

En revanche, si T_i est validée (i.e. arrivée de véhicules) et T_{i+1} est non validée (i.e. sortie de véhicules non autorisée $q_{i+1}(t) = 0$), une file d'attente se forme. La taille de cette file d'attente évolue alors selon l'équation différentielle continue suivante :

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = q_i(t) \quad (2.16)$$

Les paramètres des modèles RdPCV peuvent être exprimés, en fonction des paramètres du trafic sur la section de voirie i , à savoir le débit maximal $q_{\max i}$, la vitesse limitée $u_{\max i}$

(représenter dans le diagramme fondamental de la figure 1.3) et la densité maximale $k_{\max i}$ (Tolba, 2001).

$$\begin{aligned}
 q_{\max i} &= \frac{u_{\max i}}{\Delta_i} \\
 a_j &= \frac{q_{\max i} \Delta_i}{u_{\max i}} \\
 c_i &= k_{\max i} \Delta_i
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

Dans cette contribution, nous considérons le trafic routier comme un ensemble de véhicules représentés par les variables moyennes de flux de circulation à savoir la densité, le débit et la vitesse. Il s'agit d'une approche macroscopique faisant intervenir des modèles de trafic du premier ordre, décrit dans le premier chapitre.

L'évolution du RdPCV passe par plusieurs phases, une phase étant une période de temps pendant laquelle l'expression des vitesses en fonction des marquages demeure inchangée.

Le passage d'une phase à la suivante se fait lorsque le marquage d'une place P_i franchit le seuil $m_i = 1$, dans un sens ou dans l'autre.

La première phase, appelée phase exponentielle va durer tant que $a_i < c_i - m_i$ et $a_i > m_i$ telle que :

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } a_i < c_i - m_i \text{ et } a_i > m_i \text{ alors:} \\
 &\left\{ \begin{aligned} q_i(t) &= q_{\max i} \\ q_{i+1}(t) &= q_{\max i+1} m_i(t) \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

Lorsque le marquage m_i atteint la valeur 1, nous passons à la seconde phase, dite phase linéaire définie par :

$$\begin{aligned}
 &\text{Si } a_i < c_i - m_i \text{ et } a_i < m_i \text{ alors:} \\
 &\left\{ \begin{aligned} q_i(t) &= q_{\max i} \\ q_{i+1}(t) &= q_{\max i+1} \end{aligned} \right.
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

Une deuxième phase exponentielle se produit lorsque $c_i - m_i = 1$, est définie telle que :

Si $a_i > c_i - m_i$ et $a_i < m_i$ alors :

$$\begin{cases} q_i(t) = q_{\max i}(c_i - m_i(t)) \\ q_{i+1}(t) = q_{\max i+1} \end{cases} \quad (2.20)$$

La résolution des équations différentielles, associées à ces trois phases, conduit à l'évolution du marquage en fonction du temps, représentée sur la figure 2.4, τ_i et τ'_i étant les instants où on passe d'une phase à une autre.

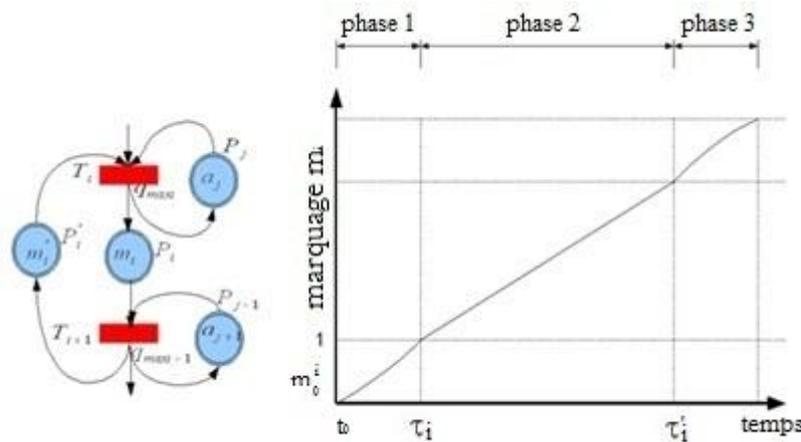


Figure 2. 4. Phases correspondant aux équations de marquage

2.2.3 Modèle RdP hybride proposé pour un croisement simple de deux files

Nous avons présenté précédemment le modèle RdPH et montré qu'il est bien adapté à la modélisation de l'écoulement continu du trafic sur une voie du carrefour. Toutefois, dans un carrefour à feux la circulation de véhicules est inhérente aux changements des états des feux. L'évolution du trafic est caractérisée par deux comportements : un comportement de passage pendant le vert et un comportement d'arrêt pendant le rouge, cette dynamique peut être représentée par un RdPH composé par le RdPCV de la figure 2.3 et un modèle RdPT représentant l'état des feux de signalisation. (Dridi, 2012)

Considérons deux flux incompatibles du carrefour étudié dans le premier chapitre, figure 1.4. Prenons, par exemple, la voie 8 (Est-Ouest) et la voie 11 (Nord-Sud). Ces deux voies forment un croisement simple.

Les places P_{111} et P_{81} de la figure 2.5 représentent respectivement le nombre des véhicules s'approchant du carrefour issus des flux 11 et 8. Les places P_{113} et P_{83} représentent les capacités des 2 tronçons 11 et 8. Les places P_{112} et P_{82} représentent les véhicules s'appêtant à traverser le carrefour. Un jeton dans la place P_{118}^1 (resp P_{118}^2) représente un feu vert pour le flux 11 (resp 8). La durée du feu vert correspond à la durée de franchissement des transitions T_{118}^1 et T_{118}^2 , figure 2.5.

$$\forall i \in \{11, 8\}$$

- P_{i1} : véhicules arrivant sur le $i^{\text{ème}}$ flux,
- P_{i2} : véhicules présents sur le tronçon de le $i^{\text{ème}}$ flux,
- P_{i3} : places disponibles sur le $i^{\text{ème}}$ flux,

$$\forall k \in \{1, 2\}$$

- P_{118}^k : feu vert accordé aux flux i ,
- T_{118}^k : la transition représentant la durée d_{ij} du feu vert.

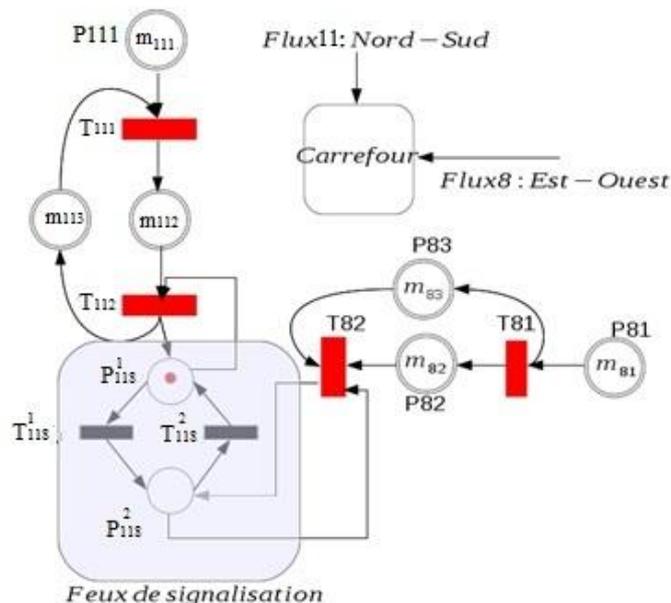


Figure 2. 5. Modèle RdPH d'un croisement de 2 flux.

Les véhicules sur la voie 11 continuent à traverser le carrefour pendant une durée du vert égale à T_{118}^1 . Toutefois, l'absence d'un jeton dans la place P_{118}^2 rend la transition T_{118}^2 non franchissable. Lorsque les véhicules arrivent à la voie 8, ils forment une file d'attente pendant une durée égale à T_{118}^2 .

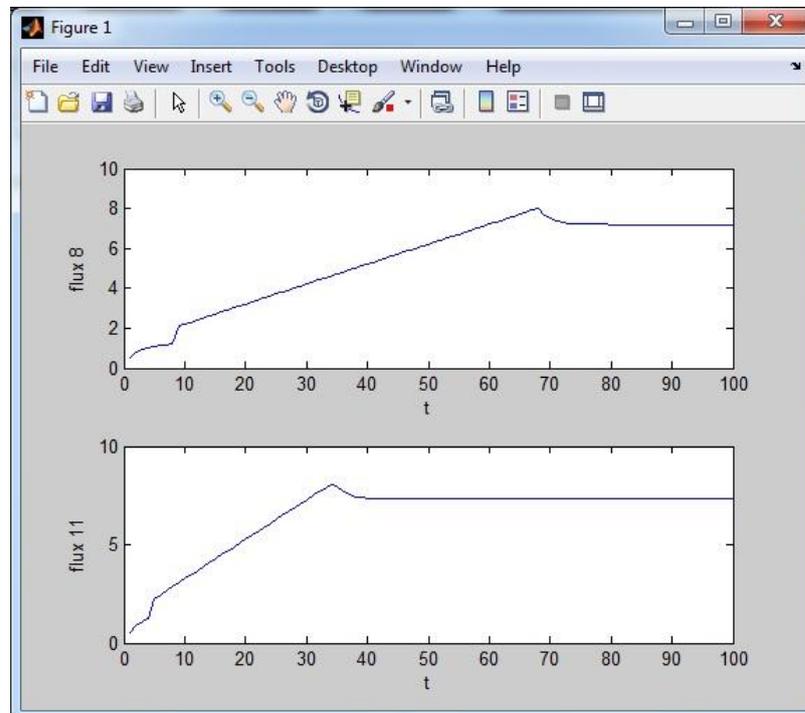


Figure 2. 6. Evolutions des flux relatifs aux voies 8 et 11

2.2.4. Modèle RdP hybride proposé pour un carrefour global étudié

Nous pouvons ainsi modéliser le carrefour isolé à quatre phases présenté précédemment dans la figure 1.4, comme une ressource qui peut laisser un certain nombre de véhicules traverser le carrefour en parallèle.

Le modèle a pour objectif de décrire l'évolution temporelle du nombre de véhicules dans le réseau en fonction des durées des phases de vert de tous les feux de signalisation, le pas de temps discret étant la durée du cycle.

Ce carrefour comporte quatre phases pour les flux compatibles (1,7),(2,8),(5,11) et (4,10)

Les places P_{i1} de la figure 2.6 représentent respectivement le nombre des véhicules s'approchant du carrefour issus des flux i . Les places P_{i3} représentent le nombre de places

disponibles des voies i dans le carrefour. Les places P_{i2} représentent les véhicules s'apprêtant à traverser le carrefour.

Deux jetons dans la place $P_{j_{i1}}$ représentent le nombre de franchissements des véhicules pouvant entrer en même temps dans le carrefour et un jeton dans les places $P_{j_{i2}}$ représente le nombre de franchissements des véhicules sortant du carrefour. Les places P_3, P_6, P_9 et P_{12} sont les voies de sorties.

Un jeton figure dans la place P_{17} (resp P_{28}, P_{511} et P_{410}) pour indiquer l'état du feu vert pour la phase 1 (resp 2,3 et 4). La durée du feu vert correspond à la durée de franchissement des transitions T_{17}, T_{28}, T_{511} et T_{410} , figure 2.6.

Dans cette section, en se basant sur la modélisation présentée dans la section précédente, le réseau de Pétri hybride relatif à l'intersection de la figure 2.2 est consigné dans la figure 2.6. Ce modèle RdPH proposé est caractérisé comme suit :

$$\forall i \in \{1,2,4,5,7,8,10,11\}$$

- P_{i1} : véhicules arrivant sur le $i^{\text{ème}}$ flux,
- P_{i2} : véhicules présents sur le tronçon de le $i^{\text{ème}}$ flux,
- P_{i3} : places disponibles sur le $i^{\text{ème}}$ flux,
- P_3, P_6, P_9, P_{12} : places de sortie,
- a_j : paramètres de franchissement simultané des transitions T_{i1} et T_{i2} . ($a_i = 2$ véhicules et $a_{i+1} = 1$ véhicule).

Les feux de circulation du modèle discret proposé sont représentés par les places P_{ij} et les transitions T_{ij} , avec:

- P_{ij} : feu vert accordé aux flux $\{i,j\}$,
- T_{ij} : transition représentant la durée d_{ij} du feu vert.

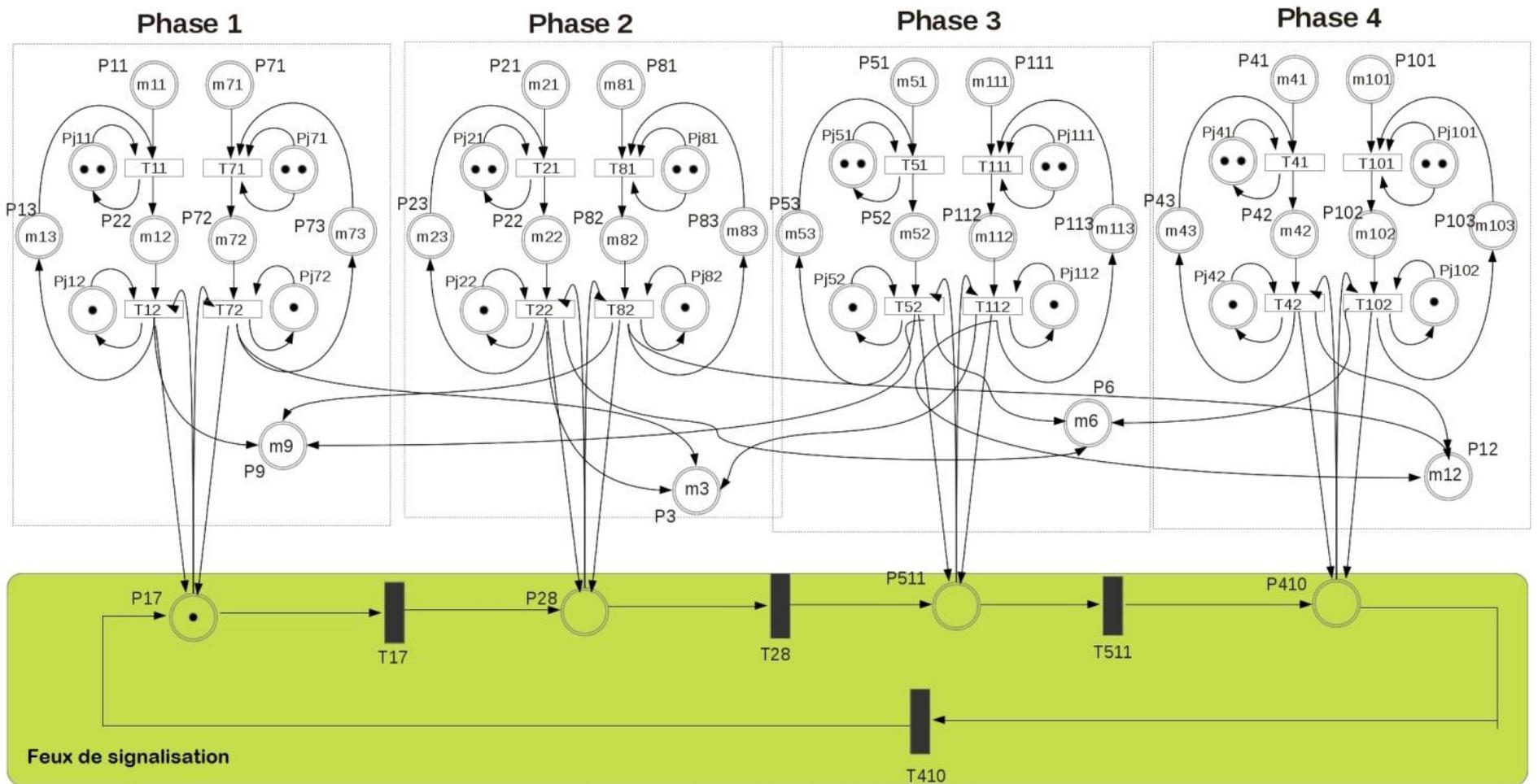


Figure 2. 7. Modèle RdPH global du carrefour étudié

La présence d'un jeton dans la place P_{17} indique l'état vert du feu. La transition T_{17} est donc franchissable. Les véhicules sur la voie 1 et 7 continuent de traverser le carrefour pendant une durée du vert d_{17} .

Cependant, l'absence d'un jeton dans les places P_{28} , P_{511} et P_{410} rend les transitions T_{28} , T_{511} et T_{410} non franchissables, c'est-à-dire l'état rouge du feu sur les voies 2, 8, 5, 11, 4 et 10.

Lorsque les véhicules arrivent dans ces voies, ils forment une file d'attente pendant des durées égales à d_{28} , d_{511} ou d_{410} .

Pendant un cycle de feu $[t_0, t_f]$, l'écoulement du trafic dans l'intersection est régi par le système d'équations suivant, tc étant temps de cycle,

- pour $t \in [0, tc]$

$$S1 = \begin{cases} \text{Phase 1 feu vert:} \\ q_i(t) = q_{\max i1} \min(a_{i1}, c_{i1} - m_{i1}(t)) - q_{\max i2} \min(a_{i2}, c_{i2} - m_{i2}(t)) \\ \text{Phase 2,3,4 feu rouge:} \\ q_{i+1}(t) = q_{\max i+1} \min(a_{i+1}, m_i(t)) \end{cases} \quad (2.21)$$

avec les conditions initiales $m_i(0) = m_{i0}, \forall i \in \{1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11\}$

- pour $t \in [tc, tf]$

$$S2 = \begin{cases} \text{Phase 1 feu rouge:} \\ q_i(t) = q_{\max i1} \min(a_{i1}, c_{i1} - m_{i1}(t)) \\ \text{Phase 2,3,4 feu vert:} \\ q_{i+1}(t) = q_{\max i+1} \min(a_{i+1}, m_{i1}(t)) - q_{\max i2+1} \min(a_{i2}, c_{i2} - m_{i2}(t)) \end{cases} \quad (2.22)$$

les conditions initiales $m_i(tc)$ étant calculées par S1.

La même approche peut être mise en œuvre pour les 3 autres phases.

La modélisation des systèmes dynamiques hybrides nous a permis de décrire les deux comportements : d'une part, la dynamique continue des véhicules entrant dans l'intersection généralement représentée par un système d'équations différentielles et d'autre part, la

dynamique discrète pour la gestion des états des feux représentée par un ensemble d'états et de transitions.

2.3. Approche de simplification de la modélisation d'un carrefour

Principe de l'approche multimodèle pour la représentation du carrefour

Pour réaliser les objectifs de la commande, l'automaticien, a souvent besoin d'un modèle ou d'un ensemble de modèles qui représentent convenablement le processus dans ses divers domaines de fonctionnement (Delmotte, 1997). Le processus peut être décrit par plusieurs modèles M_1, M_2, \dots, M_n possédant chacun un domaine de validité $D_i, i = 1, \dots, n$.

C'est pourquoi, nous pouvons envisager où exploiter une approche multimodèle dans laquelle les systèmes S1 et S2, paragraphe 2.2.4, sont décrits par plusieurs modèles linéaires, chacun représentant le système localement, i.e. chaque modèle linéaire décrit l'évolution de la file d'attente m_i par des équations différentielles du premier ordre pendant une période de temps que l'on appelle phase linéaire.

Le système non linéaire (S1 et S2) peut être décrit en un ensemble de modèles linéaires affines, activés séquentiellement en fonction des conditions initiales m_i^0 (Tolba, 2004). Le modèle correspondant à chaque phase linéaire PL est un modèle linéaire continu décrit par une équation différentielle du premier ordre dans laquelle les fréquences de franchissement $q_{\max i}$ sont considérées comme des entrées du système.

Le passage d'une phase à la suivante est appelé commutation et la durée d'un cycle complet de phases d'un feu appelée période. Chaque période comporte deux phases de feux vert et rouge, sachant que chaque phase de feu peut comporter une ou plusieurs phases linéaires, alors que, chaque phase linéaire ne correspond qu'à une seule phase de feux.

Elaboration d'une base de modèles linéaires

La résolution des équations différentielles, associées respectivement aux systèmes S1 et S2, en fonction des conditions initiales, le temps initial t_0 et l'état initial m_i^0 , conduit aux solutions conformément à la 2.23, 2.24 et 2.25 suivantes de marquages m_i , chaque cas correspondant à une phase linéaire ou exponentielle, figure 2.4.

Lorsque le système SI est activé (équation 2.21), les dynamiques de la variable de marquage m_i peuvent être exprimées en 3 phases linéaires, la validation de chaque phase linéaire étant inhérente à la valeur du marquage m_i .

La première phase linéaire est validé lorsque, $a_i < c_i - m_i$ et $a_{i+1} > m_i$. Ainsi, la résolution de l'équation différentielle de cette phase, conduit à une expression exponentielle décrivant l'évolution du marquage qui a le feu vert, équation 2.23. Par contre si $m_i < c_i - a_i$ et $a_{i+1} < m_i$, le marquage dépasse la valeur 1 et la deuxième phase sera validée. Ce qui nous mène une équation linéaire affine, équation 2.24. Enfin, lorsque $a_{i+1} > m_i$ et $m_i > c_i - a_i$, la troisième phase sera validée, le marquage m_i évolue d'une manière exponentielle, équation 2.25.

Notons qu'il existe une quatrième phase, qui n'est validée, du fait que le marquage ne peut vérifier à la fois les conditions : $a_{i+1} > m_i$ et $m_i < c_i - a_i$.

$$\text{phase 1: } m_i(t) = \frac{q_{\max i}}{q_{\max i+1}} + \left[m_i^0 - \frac{q_{\max i}}{q_{\max i+1}} \right] e^{-q_{\max i+1}(t-t_0)} \quad (2.23)$$

$$\text{phase 2: } m_i(t) = (q_{\max i} - q_{\max i+1})(t - \tau_i) + m_i^{\tau_i} \quad (2.24)$$

$$\text{phase 3: } m_i(t) = \frac{q_{\max i} c_i - q_{\max i+1}}{q_{\max i}} + \left[m_i^0 - \frac{q_{\max i} c_i - q_{\max i+1}}{q_{\max i}} \right] e^{-q_{\max i}(t-t_0)} \quad (2.25)$$

Comme nous l'avons signalé précédemment, chaque période comporte deux phases de feux vert et rouge, il s'avère nécessaire pour la gestion du trafic d'élaborer les solutions relatives aux marquages de $S2$ correspondants au feu rouge.

Ce système se divise en deux phases linéaires, puisqu'il n'y pas de sortie de véhicules, $a_{i+1} = 0$.

Nous envisageons de tenir compte, dans ce cas, du nombre de franchissements à l'entrée, a_i .

Les deux phases linéaires, 4 et 5 suivantes sont aussi validées lorsque :

$$m_i < c_i - a_i, \text{ phase 4: } m_i(t) = m_i^0 e^{-q_{\max i+1}(t-t_0)} \quad (2.26)$$

$$m_i > c_i - a_i, \text{ phase 5: } m_i(t) = q_{\max i+1} t + m_{i2}^0 \quad (2.27)$$

Mise en œuvre du modèle linéaire

Pour chaque paire de voies (i, j) ayant le feu vert, on appelle τ_i (respectivement τ_j) le temps nécessaire au passage d'une phase à une autre pour la file d'attente q_i (respectivement q_j) présenté par le marquage m_{i2} (respectivement m_{j2}) pour atteindre la valeur 1 et pour chaque paire de voie (i, j) ; on appelle aussi τ'_i (respectivement τ'_j) le temps nécessaire au passage d'une phase à une autre pour la file d'attente q_i (respectivement q_j) présenté par le marquage m_{i2} (respectivement m_{j2}) pour atteindre la valeur $C_{i2} - 1$ (respectivement $C_{j2} - 1$). C_{i2} (respectivement C_{j2}) est la capacité de la voie i (respectivement j). Ces paramètres sont calculés plus loin selon les données initiales.

Si nous notons λ_{i2} (respectivement λ_{j2}) la vitesse de franchissement de la transition T_{i1} (respectivement T_{j2}) et m_{i2}^0 (respectivement m_{j2}^0) le marquage initial de la place P_{i1} (respectivement P_{j2}), figure 2.6, il vient les expressions de τ_i, τ_j, τ'_i et τ'_j .

$$\tau_i = \frac{1 - m_{i2}^0}{(\lambda_{i1} - \lambda_{i2})}, \tau_j = \frac{1 - m_{j2}^0}{(\lambda_{j1} - \lambda_{j2})}, \tau'_i = \frac{(C_{i2} - 1) - m_{i2}^0}{(\lambda_{i1} - \lambda_{i2})}, \tau'_j = \frac{(C_{j2} - 1) - m_{j2}^0}{(\lambda_{j1} - \lambda_{j2})}. \quad (2.28)$$

Nous allons, maintenant, élaborer les expressions des marquages, m_{i2}, m_{j2}, m_{k2} et m_{l2} validées dans leurs domaines respectifs. La validation de chaque phase linéaire est inhérente à la valeur du marquage en tenant compte des conditions initiales. Chaque système présente trois phases linéaires pour chaque voie. les voies i et j ayant le feu vert, et les voie k et l ayant le feu rouge :

avec :

Φ étant l'ensemble de groupe de flux compatible.

$$\forall (i, j) \in \Phi, \forall (k, l) \in \Phi - \{(i, j)\}; \Phi = \{(1, 7), (2, 8), (5, 11), (4, 10)\}$$

$$m_{i2}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i2}} + \left[m_{i2}^{t_0} - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i2}} \right] e^{-\lambda_{i2}(t-t_0)} & t < \tau_i \\ (\lambda_{i1} - \lambda_{i2}) \times (t - \tau_i) + m_{i2}^{\tau_i} & \tau_i < t < \tau_i' \\ \frac{\lambda_{i1} C_{i2} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1}} + \left[m_{i2}^{\tau_i'} - \frac{\lambda_{i1} C_{i2} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1}} \right] e^{-\lambda_{i1}(t-\tau_i')} & t > \tau_i' \end{cases} \quad (2.29)$$

$$m_{j2}(t) = \begin{cases} \frac{\lambda_{j1}}{\lambda_{j2}} + \left[m_{j2}^{\tau_j} - \frac{\lambda_{j1}}{\lambda_{j2}} \right] e^{-\lambda_{j2}(t-\tau_j)} & t < \tau_j \\ (\lambda_{j1} - \lambda_{j2}) \times (t - \tau_j) + m_{j2}^{\tau_j} & \tau_j < t < \tau_j' \\ \frac{\lambda_{j1} C_{j2} - \lambda_{j2}}{\lambda_{j1}} + \left[m_{j2}^{\tau_j'} - \frac{\lambda_{j1} C_{j2} - \lambda_{j2}}{\lambda_{j1}} \right] e^{-\lambda_{j1}(t-\tau_j')} & t > \tau_j' \end{cases} \quad (2.30)$$

$$m_{k2}(t) = \lambda_{k1} t + m_{k2}^{t_0} \quad \text{et} \quad (2.31)$$

$$m_{l2}(t) = \lambda_{l1} t + m_{l2}^{t_0}$$

$m_{i2}^{\tau_i}$ (respectivement $m_{j2}^{\tau_j}$) étant le marquage de la voie i (respectivement j) à l'instant τ_i (respectivement τ_j) et $m_{k2}^{t_0}$ et $m_{l2}^{t_0}$ les marquages des voies k et l à l'instant t_0 .

Les relations précédentes sont utilisées ici, en particulier pour calculer la longueur des files d'attentes.

En effet, dans la figure 2.8, on remarque l'évolution du marquage m_i pour une seule voie du carrefour, pendant plusieurs cycles de feux.

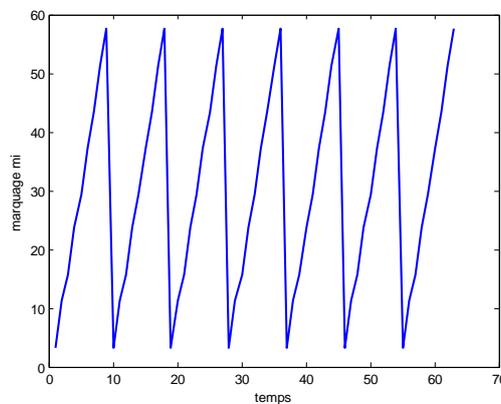


Figure 2. 8. Evolution du marquage m_i au cours du temps

Dans le cas où le temps de feu vert égal à 40 secondes, des arrivées de véhicules importants et la capacité du tronçon C_{i2} égale à 8 véhicules, nous remarquons, dans figure 2.9, que la file d'attente augmente même au cours du feu vert, la capacité du tronçon C_{i2} n'est donc adaptée à ce nombre important de véhicules d'arrivées $nveh$.

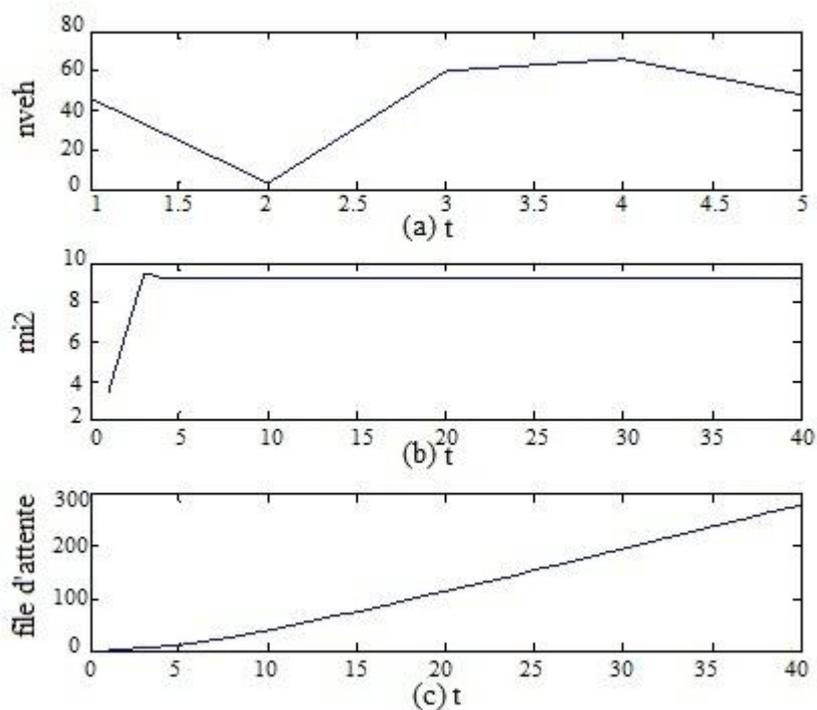


Figure 2. 9. Evolution de la file d'attente (c) et du marquage (b) pour une phase de feu vert de 40 secondes en fonction des évolutions du débit (a)

Le deuxième exemple traité ici est relatif à un temps de feu vert égal à 40 secondes avec des arrivées de véhicules moyen, la capacité du tronçon C_{i2} étant égale à 8 véhicules.

Nous remarquons pour ce deuxième exemple, que la variation de la file d'attente (c) n'est plus monotone croissante, comme dans l'exemple précédent, vu que le nombre d'arrivées (a) est faible par rapport à la durée du feu vert de 40 secondes, figure 2.10. L'évolution de tous les véhicules, s'effectue dans ce cas sans congestion.

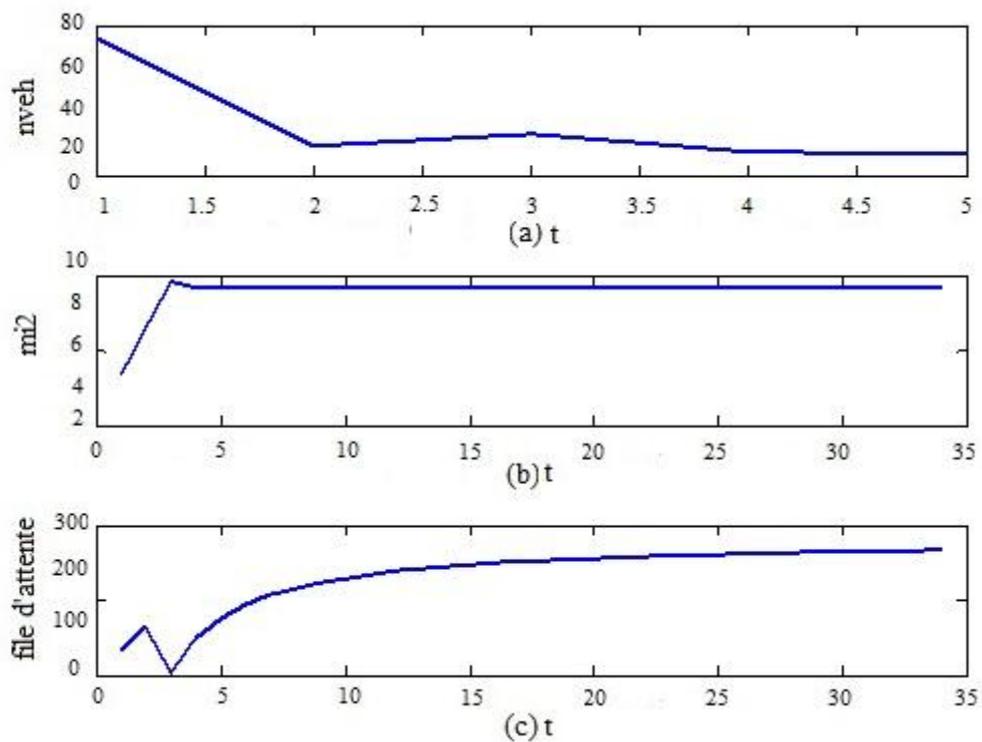


Figure 2. 10. Evolution de la file d'attente (c) et du marquage (b) pour une phase de feu vert de 40 secondes en fonction des évolutions du débit faible (a)

Ces deux exemples montrent, que la durée de feux verts et le débit entrant dans une intersection, ont, une influence certaine sur le critère, files d'attente du trafic.

L'évolution des trois critères à la fois, les files d'attente, le temps d'évacuation total et le temps d'attente est considérée dans le chapitre suivant.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles RdP du trafic qui ont permis de reprendre soigneusement les caractéristiques de la circulation de véhicules dans une intersection et montré l'application des RdPs pour l'étude du trafic urbain.

Constatant que l'écoulement du trafic est considéré comme continu conformément au principe de continuité définissant l'approche de modélisation macroscopique du trafic et que l'évolution du trafic dans les carrefours à feux est caractérisée par un comportement hétérogène du fait que la circulation de véhicules est liée aux changements d'états des feux, nous avons utilisé les RdP continu pour décrire l'écoulement du trafic sur les 8 voies du

carrefour étudié ainsi que le modèle RdP Temporisé pour la modélisation de la gestion des feux. Cette dynamique est modélisée par les RdP Hybrides proposés.

Nous avons modélisé, par la suite le carrefour par l'approche multimodèles, qui nous a permis de décrire le comportement des flux de véhicules par des phases activées séquentiellement, relatives à des situations particulières du trafic. Une fois que le changement de phase linéaire est déterminé, il s'avère pertinent d'élaborer des stratégies de commande des feux qui s'adaptent aux fluctuations du trafic.

Compte tenu de la complexité de l'implantation des systèmes de régulation du trafic, il n'existe pas de méthode parfaite pour contrôler le flux dans un carrefour à feux. L'adéquation d'une application est très liée à la condition du trafic. Cependant, la plupart des stratégies de régulation est destinée, de manière exclusive, aux méthodes d'optimisation pour minimiser un critère formulé. Pour mieux contrôler les feux de signalisation, des informations précises en temps réel sur les conditions de circulation sont nécessaires (nombre de véhicules, temps d'entrés, dans le carrefour, temps de sortie, ...). Des algorithmes efficaces exploitant ces données seront ainsi proposés dans le chapitre suivant pour trouver de bonnes solutions pour la régularisation su trafic.

Chapitre 3 :

Heuristique et stratégie de contrôle proposée pour la régulation du trafic

Introduction

Parmi les paramètres essentiels caractérisant les performances d'un carrefour à feux ou d'un réseau d'intersections, on distingue le temps de cycle, le temps du feu vert et le décalage lié au temps commun de cycle.

La quantité de temps vert consécutive, qui peut être distribuée aux phases d'une intersection, dépend de la durée du cycle (Sun, 2003), explique la minimisation du retard conduisant à des cycles de durées courtes, alors que la quantité relative aux arrêts au niveau du carrefour indique des cycles de longues durées.

Les cycles de longues durées, pouvant arrêter tout un groupe de véhicules (également connu comme étant un peloton), présentent l'avantage de ne nécessiter qu'un seul arrêt mais induisent un grand retard pour ce groupe. Avec un temps de cycle court les véhicules n'attendent pas longtemps au feu vert, mais ont une moyenne de temps d'arrêts importante.

Le temps de cycle d'une intersection est l'un des paramètres les plus importants dans un plan de signalisation car il fixe des limites inférieures et supérieures pour les temps de feu vert des phases.

Dans le cadre de notre travail, nous adoptons une stratégie différente pour résoudre le problème de régulation du trafic urbain en utilisant les feux de signalisation. Nous nous sommes investis dans la recherche d'un moyen permettant d'éviter la congestion en forçant les files d'attente à ne pas dépasser le niveau de trafic correspondant à l'optimum opérationnel des voies.

Dans ce chapitre, nous proposons donc des méthodes de résolution approchées afin de trouver, en un temps raisonnable une séquence de passage satisfaisante des véhicules pour chaque carrefour. Les algorithmes correspondant ont, pour objectif d'assurer une bonne qualité de solution obtenu avec un temps de calcul réduit.

Enfin, nous illustrons la mise en œuvre des différentes approches proposées, par simulation, afin d'évaluer leurs performances.

3.1. Performances souhaitées pour le trafic

3.1.1. Les données sur les véhicules

Supposons qu'à un instant initial $t_0 = 0$, n véhicules s'approchent d'un carrefour. Ces véhicules sont détectés dès leur entrée dans la zone de couverture et les données de tous ces véhicules sont alors reçues instantanément par le contrôleur du carrefour (Yan, 2008).

Les informations de chaque véhicule transmises, indiquent :

- l'identificateur du véhicule : utilisé pour identifier chaque véhicule,
- le numéro de la voie à laquelle le flux des véhicules appartient, c'est à dire, la voie sur laquelle le véhicule se déplace,
- le temps (ou date) d'arrivée du véhicule qui est le temps exact auquel un véhicule arrive à la file d'attente à partir de t_0 .

Notons que le temps de traversée d'un véhicule dans un carrefour est l'intervalle de temps pendant lequel un véhicule peut accélérer de sa position d'attente jusqu'à ce qu'il atteigne une distance de sécurité avec le véhicule suivant sur la même voie (dans le même flux). Nous pouvons considérer cet intervalle comme étant constant pour chaque véhicule et ne dépend que du type de véhicule. En effet, les camions, par exemple, sont plus lents que les petits véhicules, ont besoin de plus de temps pour démarrer et, par conséquent, plus de temps pour accélérer jusqu'à ce qu'il puisse atteindre une distance suffisante avec le véhicule suivant.

Les tableaux (3.1), (3.2) et (3.3) présentent les données relatives aux nombres de véhicules arrivant dans un carrefour dans différentes heures pour une même journée.

Nous avons effectué une collecte des données relatives à des véhicules de même type, chaque minute pendant 7 minutes.

Tableau 3. 1 Nombre de véhicules arrivant de la simulation 1

Lundi 8h20 20/10/2014	0	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn	6 mn	7 mn
Voies 1,2	18	22	32	40	23	18	27	22
Voies 4,5	27	31	56	49	27	22	36	31
Voies 7,8	30	31	49	78	35	29	44	33
Voies 10,11	16	1	15	20	17	10	26	8
Total véh	91	85	152	187	102	79	133	94

Tableau 3. 2. Nombre de véhicules arrivant de la simulation 2

Lundi 15h 20/10/2014	0	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn	6 mn	7 mn
Voies 1,2	12	11	7	14	10	22	7	12
Voies 4,5	5	3	11	17	3	15	5	8
Voies 7,8	13	5	10	20	25	14	10	12
Voies 10,11	26	31	44	15	10	26	12	5
Total véh	56	50	72	67	48	77	34	37

Tableau 3. 3. Nombre de véhicules arrivant de la simulation 3

Lundi 17h 20/10/2014	0	1 mn	2 mn	3 mn	4 mn	5 mn	6 mn	7 mn
Voies 1,2	35	40	34	22	44	32	26	41
Voies 4,5	43	41	44	38	23	49	35	39
Voies 7,8	76	40	46	55	38	25	41	58
Voies 10,11	61	22	37	20	40	56	44	69
Total véh	215	143	161	135	145	162	146	207

3.1.2. Les critères à optimiser

Typiquement, il y a trois critères utilisés fréquemment pour évaluer la performance d'une stratégie de régulation du trafic (Yan, 2008) ; ils portent sur :

- la longueur moyenne de queue;
- le temps total d'évacuation (débit de sortie);
- le temps moyen d'attente.

Nous allons nous intéresser, ici, au deuxième et au troisième critère, à savoir, le temps total d'évacuation et le temps d'attente, et nous allons montrer comment calculer la longueur des files d'attentes en utilisant l'approche multimodèle.

3.2. Détermination de la longueur de la file d'attente proposée pour la multiprogrammation à temps fixe

La théorie des files d'attente s'attache à modéliser et à analyser de nombreuses situations en apparence très diverses, mais qui relèvent toutes un schéma descriptif général. Des conducteurs arrivent à intervalles aléatoires dans un carrefour comportant plusieurs phases de feux verts auxquelles ils vont adresser une requête. La durée du service auprès de chaque phase est donc elle-même aléatoire. Après que leurs requêtes ont été traitées et ont été servis, les conducteurs quittent le carrefour.

Le but de l'analyse est de caractériser le degré de performance du carrefour sachant que les arrivées des véhicules peuvent être groupées ou individuelles, en répondant à des questions telles que:

- quel est le temps moyen d'attente d'un conducteur avant d'être servi?
- quel est le nombre moyen de véhicules dans le système?

3.2.1. Méthode et algorithme pour le calcul de la file d'attente

3.2.1.1 Méthode

Pour des longueurs initiales de files d'attente données

$$m_0(P_{i2}) = m_{i2}^{t_0}, m_0(P_{j2}) = m_{j2}^{t_0} \quad (3.1)$$

$$\forall (i,j) \in \Phi, \text{ avec } \Phi = \{(1,7), (2,8), (5,11), (4,10)\}$$

et pour la durée du temps d'horizon T, la fonction coût relative aux longueurs de file d'attente, est donnée par :

$$\text{cost} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{\text{les voies } i} m(P_{i2})(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{0 < (i,j) \in \Phi} m_{i2}(t) dt \quad (3.2)$$

ou encore par Δt

$$d\text{cost} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} m_{i2}(t) dt + \int_0^{\Delta t} m_{j2}(t) dt + \frac{1}{\Delta t} \sum_{\substack{(k,l) \in \Phi \\ (k,l) \neq (i,j)}} \int_0^{\Delta t} [m_{k2}(t) + m_{l2}(t)] dt \quad (3.3)$$

Pour le temps restant de la phase en cours avant la fin du temps d'horizon, on définit l'incrément de la fonction de coût, notée $d\text{cost}$, comme suit :

$\forall (i,j) \in \Phi, \forall (k,l) \in \Phi - \{(i,j)\}$ avec les voies (i,j) ayant le feu vert :

$$d\text{cost} = \int_0^{\Delta t} m_{i2}(t) dt + \int_0^{\Delta t} m_{j2}(t) dt + \sum_{\substack{(k,l) \in \Phi \\ (k,l) \neq (i,j)}} \int_0^{\Delta t} [m_{k2}(t) + m_{l2}(t)] dt \quad (3.4)$$

avec :

$$\int_0^{\Delta t} m_{i2}(t) dt = \begin{cases} \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i2}} \Delta t - \left[m_{i2}^{t_0} - \frac{\lambda_{i1}}{\lambda_{i2}} \right] \frac{e^{-\lambda_{i2}(\Delta t - t_0)}}{\lambda_{i2}} & \Delta t < \tau_i \\ \frac{(\lambda_{i1} - \lambda_{i2})}{2} \Delta t^2 + m_{i2}^{\tau_i} \Delta t & \tau_i < \Delta t < \tau_i' \\ \frac{\lambda_{i1} C_{i2} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1}} \Delta t - \left[m_{i2}^{\tau_i'} - \frac{\lambda_{i1} C_{i2} - \lambda_{i2}}{\lambda_{i1}} \right] \frac{e^{-\lambda_{i1}(t - \tau_i')}}{\lambda_{i1}} & \Delta t > \tau_i' \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\int_0^{\Delta t} m_{j2}(t) dt = \begin{cases} \frac{\lambda_{j1}}{\lambda_{j2}} \Delta t - \left[m_{j2}^{\tau_j} - \frac{\lambda_{j1}}{\lambda_{j2}} \right] \frac{e^{-\lambda_{j2}(t - \tau_j)}}{\lambda_{j2}} & \Delta t < \tau_j \\ \frac{(\lambda_{j1} - \lambda_{j2})}{2} \Delta t^2 + m_{j2}^{\tau_j} \Delta t & \tau_j < \Delta t < \tau_j' \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\int_0^{\Delta t} m_{k2}(t) dt = \frac{\lambda_{k1}}{2} \Delta t^2 + m_{k2}^{t_0} \Delta t \quad \forall \Delta t$$

(3.7)

$$\int_0^{\Delta t} m_{l2}(t) dt = \frac{\lambda_{l1}}{2} \Delta t^2 + m_{l2}^{t_0} \Delta t \quad \forall \Delta t$$

3.2.1.2. Algorithme

Pour montrer l'efficacité de ces équations, nous allons les introduire dans l'algorithme de calcul de la longueur de la file d'attente suivant :

Initialisation : $t=0, cost = 0$;

Tant que $t \leq T$ (Temps d'horizon) faire

Calculer le temps restant Δt avant la fin de la phase en cours

Calculer les longueurs des files à l'instant $t + \Delta t$

$$dcost = m_{i2}(t + \Delta t) + m_{j2}(t + \Delta t) + \sum_{\substack{(k,l) \in \Phi \\ (k,l) \neq (i,j)}} m_{k2}(t + \Delta t) + m_{l2}(t + \Delta t)$$

Additionner l'incrémentation du cost : $cost = cost + dcost$

Mise à jour du temps $t = t + \Delta t$

Lancer la transition discrete T_{ij}

Fin

Le total de la fonction $cost$ est donné par : $cost_{total}(t) = \frac{1}{t} cost$

3.2.2. Mise en œuvre de la méthode

Cet algorithme proposé concerne tous les véhicules qui entrent à l'intersection avant la fin du temps à l'horizon T. Après chaque phase de durée Δt , une durée de temps t est mise à jour ; les paramètres de véhicules entrants sont estimées à nouveau à l'instant $t + \Delta t$, et des retards de commutation sont calculés et appliqués. Pour montrer l'effet sur la file d'attente et l'importance de la durée de feu vert sur la régulation du trafic, nous calculons la file d'attente,

pour une durée de feu vert fixe (temps de cycle), et ce pour les différentes durées de feu vert suivantes : 60, 90 et 240s.

Le temps de feu vert de 240 s, est choisi suite à une observation sur le carrefour étudié dans lequel nous avons remarqué que le flux des véhicules est très important dans les heures de pointe et peut dépasser les 200 véhicules et que nous avons donc besoin de plus de temps pour faire passer le plus de véhicules.

Ces trois valeurs relatives aux durées de feu vert ont été choisies d'après les principaux systèmes de régulation constructeurs, présents sur le marché français comme Siemens, CGA et GERTRUDE.

Les résultats correspondants sont présentés dans les figures 3.1 et 3.2.

Pour le premier système, les taux d'occupation sont déterminés sur une période fixe de 90 secondes qui ne correspond pas forcément au cycle réel puisque celui ci est variable (55 secondes la nuit, 70 secondes en période fluide, 90 secondes en période de saturation); durées des temps de cycle choisies, utilisés à Nancy dans une étude expérimentale relative à l'implantation du système qui se sont avérées être les meilleures pour les états de trafic auxquels elles correspondent et pour la géographie de la ville.

Quelques variations peuvent être dues aux prolongations ou anticipations de vert et aux transitoires de changement de cycles.

Pour le second, Il existe 3 plans de feux de jour et 2 plans de feux de nuit. Les cycles ont des durées de 60 secondes la nuit et 70, 80 ou 90 secondes le jour, selon les zones et, pour le système GERTRUDE, les durées des cycles varient de 60 à 105 ou à 110 secondes.

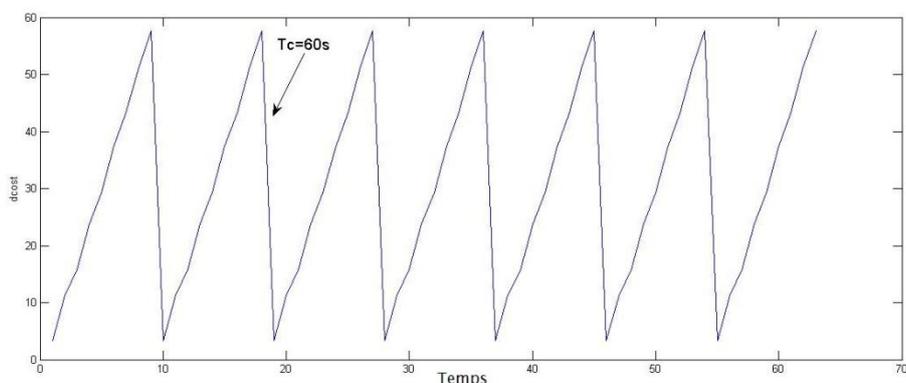


Figure 3. 1. File d'attente pour le temps de cycle 60s

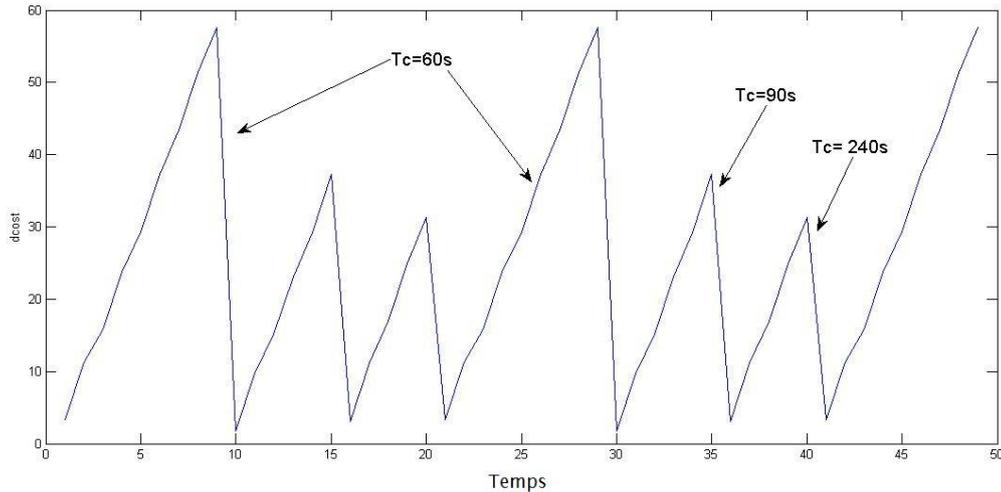


Figure 3. 2. File d'attente pour les différents temps de cycle 60s, 90s et 240s

Remarque sur la multiprogrammation à temps fixe

Nous avons utilisé, dans cette partie, la programmation horaire, appelée aussi multiprogrammation à temps fixe qui entre dans le cadre des variations régulières (Hunt, 1982) ; (Papageorgiou, 2006). Cette approche consiste à disposer de plusieurs plans de feux, selon des situations-types prédéfinies, puis à les mettre en œuvre selon un calendrier programmé.

Dans la plupart des configurations, trois plans de feux suffisent : un pour les heures de pointe (matin, midi et soir), un pour les heures creuses du jour et un pour celles de la nuit.

Les plans de feux peuvent être soumis à des corrections automatiques réalisées en fonction des observations quotidiennes des boucles électromagnétiques.

La durée du cycle doit donc être modifiée quand le volume du trafic est en augmentation. En effet, lorsque le volume du trafic augmente, un cycle court conduit à la saturation de l'intersection. Afin d'ajuster la durée du cycle à l'augmentation de la demande, le temps de cycle est augmenté dès que le taux de présence des véhicules dans le carrefour pendant le vert, dépasse le taux critique figure 3.2. L'observation d'une augmentation de la durée de cycle peut aussi conduire à une minimisation de la longueur de la file d'attente. Soulignons, enfin, qu'une baisse des débits observée peut faire baisser le temps de cycle.

Jusqu'ici, nous avons exploité l'approche multimodèle les multi modèles pour calculer le critère de longueur de file d'attente. Nous allons considérer à présent les deux autres

critères suivants retenus, qui sont aussi importants : le temps total d'évacuation et le temps moyen d'attente.

3.3. Méthodes de détermination du temps total d'évacuation

3.3.1. Idée de base et analogie intersection-montre

Dans la partie suivante, nous allons présenter notre idée pour la gestion des temps total d'évacuation des véhicules dans le carrefour, en utilisation une nouvelle heuristique.

3.3.1.1. Idée de base

Dans le cadre de l'intersection étudiée, chaque mouvement du flux de circulation observe les feux dans l'ordre suivant: Rouge, Vert et Jaune. Un temps d'intervalle vert est suivi par un temps d'intervalle jaune indiquant que le véhicule doit s'arrêter, s'il ne peut pas assurer la sécurité. Il est à noter que l'ensemble des mouvements de la circulation obéit à la même règle, à savoir à la même succession de couleurs des feux. Cependant, dans le cadre de la commande des flux de circulation, le Jaune n'est pas considéré, car il est considéré faire temps du vert effectif.

Dans le but de faire avancer les idées conduisant à une stratégie de contrôle pour les réseaux de trafic urbain, nous proposons une nouvelle heuristique pour contrôler le modèle considéré.

L'idée est basée sur l'utilisation de la durée de feu vert, qui est déterminée par une estimation du nombre de véhicules entrant dans l'intersection pendant un cycle, pour gérer le trafic.

Cette approche est tirée du concept de la montre qui apparemment n'a rien avoir avec celui relatif à un carrefour à feux. Toutefois, après une observation approfondie nous avons pu tirer des conclusions à la base d'une nouvelle approche.

Comme nous l'avons déjà défini, l'intersection de la figure.1.5, introduite dans le premier chapitre, est une zone où plusieurs flux partagent un espace conflictuel. Cet espace n'autorise pas le passage concomitant d'au moins deux flux de circulation, notés flux concurrents. Les accès successifs au carrefour, pour un même flux, sont considérés par deux véhicules en même temps, $a_j = 2$ véhicules. Évidemment, par mesure de sécurité et à cause des

temps de freinage et de démarrage, nous allons fixer le nombre de véhicules sortant de l'intersection $a_{j+1} = 1$ véhicule.

Nous allons simuler, par la suite, l'évolution du trafic dans l'intersection isolée où les feux de circulation passent dans l'ordre habituel relatif à un signal de synchronisation fixe, pour les quatre phases compatibles: $\{1,7\}$, $\{2,8\}$, $\{5,11\}$ et $\{4,10\}$.

3.3.1.2 Analogie intersection-montre

Partant de ce qui précède, considérons une montre dont le cadran est subdivisé en 4 zones à chacune associées une phase du carrefour à 4 phases étudié, figure 3.3, et ce en considérant les flux d'entrée.

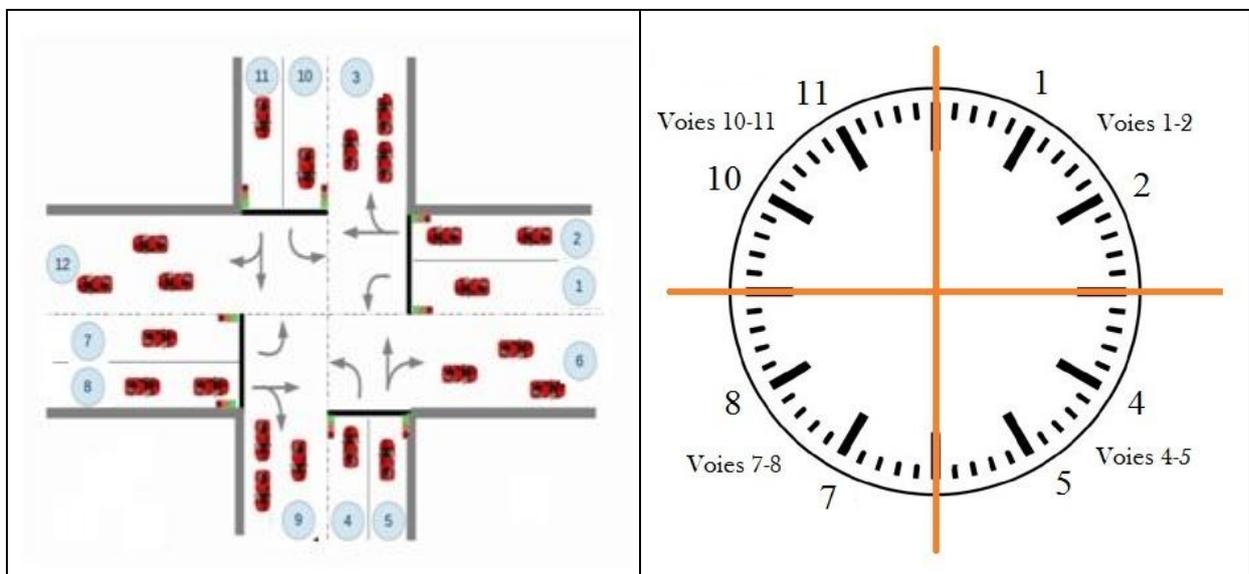


Figure 3. 3. Analogie entre la montre et le carrefour à feux

Le tableau (3.4), montre la correspondance et les analogies entre une montre et un carrefour.

Tableau 3. 4. Correspondance entre une montre et une intersection

Caractéristiques d'une montre	Caractéristiques d'une intersection
Source d'énergie (manuelle, électrique, etc.)	Véhicules entrant dans l'intersection
Accumulateur d'énergie (ressort, etc.)	Capteurs des véhicules
Organes de transmission (série de rouages)	Flux de l'intersection
Organe de distribution (roue d'échappement et ancre) et Organe régulateur (balancier-spiral)	Equation pour calculer la durée du feu vert
Organe d'affichage (cadran, aiguilles, quantités, etc.)	Feux de signalisation

Une montre est de plus un instrument de mesure du temps et dans un carrefour, le nombre de véhicules existants dans l'intersection est calculé à chaque instant.

Une heuristique basée sur le concept de la montre est élaborée et utilisée dans les deux méthodes proposées dans la suite.

3.3.2. Première heuristique proposée pour le calcul de la durée du feu vert pour les flux de tourner à gauche

En présence de deux différents flux, un flux de tourner à gauche et un flux, plus important, de continuer tout droit, contenant généralement plus de véhicules. Il est nécessaire de calculer les deux durées de feu vert correspondant à ces deux flux.

Pour l'application considérée, il s'agit des $\{1,7\}$ et $\{4,10\}$. Le calcul des durées de phase se divise ainsi en deux parties, le premier pour le flux $\{1,7\}$ et le deuxième pour le flux $\{4,10\}$.

3.3.2.1. Méthode de calcul

Pour le calcul des durées de phases, il convient de procéder de la même manière que pour l'heure sur une montre. En effet, lorsque la grande aiguille se situe avant 30 min, nous lisons par exemple 12h 15min ou bien 13h05min et par contre lorsqu'on dépasse la moitié de

l'heure, nous lisons généralement 13h moins 20 min et non pas 12h40 min, donc nous annonçons l'heure suivante (supérieure), à laquelle nous retranchons des minutes



Figure 3. 4. Temps de démarrage

Pour les deux flux $\{1,7\}$ et $\{4,10\}$, nous allons calculer la durée de feu vert, en prenant donc le nombre "maximal" de véhicules de chaque paire de flux compatibles des mouvements de tourner à gauche, à multiplier par la durée de franchissement du carrefour t_c . Nous proposons d'y ajouter un certain temps de démarrage, noté t_d .

Il vient l'expression suivante de la durée du feu vert d_{ij} :

$$\forall (i, j) \in \{(1,7), (4,10)\}$$

$$d_{ij} = t_c \max(Nbv_i, Nbv_j) + t_d \quad (3.8)$$

Nbv_i et Nbv_j étant les nombres de véhicules dans la voie i et dans la voie j , et t_c le temps de franchissement des véhicules dans le carrefour.

3.3.2.2. Mise en œuvre de la première heuristique proposée

A titre d'exemple, nous supposons que le nombre de véhicules dans les voies 7 et 1 sont respectivement 5 et 8, étant donné que la fréquence de sortie des véhicules est de 1 veh / s, et considérons, pour les flux 1, 4, 7 et 10, $t_d = t_c = 1s$. Par application de la relation 3.7, la durée vert d_{ij} est donc calculé selon la relation :

$$d_{ij} = 8t_c + t_d = 9s$$

3.3.3. Deuxième heuristique proposée pour le calcul de la durée du feu vert pour les flux importants

3.3.3.1. Méthode de calcul

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le flux d'arrivée des véhicules pour les voies {2, 5, 8 et 11} est plus important que celui avec les mouvements de tourner à gauche.

Là encore nous allons utiliser l'analogie montre/intersection.

Une autre analogie peut être mise en exergue. En effet, au temps de passage de l'aiguille d'une position à une autre, figure 3.4, que nous pouvons appeler unité ou temps de démarrage, nous pouvons faire correspondre la sortie des véhicules de la voie à la zone de conflit après le déclenchement du feu vert.

En remarquant, de plus que, pour passer d'une heure à la suite sur une montre, la grande aiguille passe nécessairement par les 4 chiffres remarquables 15, 30, 45 et 60 min, nous proposons le calcul de la durée du feu vert $d2_{ij}$ comme suit: nous divisons le nombre des véhicules entrant dans le croisement par le nombre de voies dans cette intersection que nous multiplions par la durée de franchissement du carrefour, auquel nous proposons d'ajouter le temps de démarrage d'un véhicule à l'intersection.

Pour ces deux flux {2,8} et {5,11}, il vient :

$$\forall(i, j) \in \{(2, 8), (5, 11)\}$$

$$d2_{ij} = \frac{\left(\sum_{k=1}^{IL} Nbv_k \right) t_c}{IL} + t_d \quad (3.9)$$

avec :

IL : le nombre de voies d'entrée dans le carrefour,

Nbv_k : le nombre de véhicules dans chaque IL ,

t_d : le temps de démarrage du véhicule à l'intersection,

t_c : la durée de franchissement du carrefour,

d_{2ij} : la durée de phase pour les flux (2,8),(5,11).

3.3.3.2. Mise en œuvre de la deuxième heuristique proposée

A titre d'exemple, nous supposons que le nombre de véhicules dans les voies 1, 2, 4, 5, 7, 8, 10 et 11 sont respectivement 5, 20, 7, 15, 8, 25, 6 et 18, étant donné que la fréquence de sortie des véhicules est de 1 veh / s, et considérons, pour les flux, $t_d = t_c = 1s$. Par application de la relation 3.8, la durée vert d_{2ij} est donc calculé selon la relation :

$$d_{2ij} = \frac{104t_c}{8} + t_d = 14s$$

3.3.4. Résultats obtenus par les deux heuristiques proposées

Nous supposons ici que le taux d'arrivée des véhicules est Nbv et que les véhicules sont répartis aléatoirement entre les différentes voies.

Le logiciel CELL Illustrator 5.0 est utilisé pour la modélisation et la programmation de notre approche proposée pour le calcul des temps d'évacuation à partir des paramètres relatifs à cinq scénarii, notés, Sim 1, Sim 2, Sim 3(a), Sim 3(b) et Sim 4 du tableau 3.5.

avec:

Nbv_i : nombre de véhicules, dans la voie i

TE_i : temps d'évacuation de tous les véhicules pour chaque flux,

d_{ij} : durée de feu vert.

Lors des simulations, nous avons considéré que la fréquence maximale de franchissement pour la transition $Ti1$ est égale à 2 véh/s et que la fréquence de la transition $Ti2$ est de 1 véh/s, l'intersection étant supposée dirigée par un plan de signalisation à durée fixe.

Etape 1 : Sim 1

Nous supposons d'abord que $Nbv = 110$ et que la durée d_{ij} , associée à la transition discrète (durée du feu vert), est la même et fixée à 5 secondes (Sim1), tableau 3.5. L'évolution du marquage est indiquée sur la figure 3.5.

Tableau 3. 5. Les paramètres relatifs à la simulation 1

Voie i	Nbv _i	Sim 1		Sim 2		Sim 3 (cas a)		Sim 3 (cas b)		Sim 4	
		dij	TE1	dij	TE2	dij	TE3	dij	TE4	dij	TE6
1	5	5	18	7	4	10	4	10	4	9	5
2	20	5	78	10	72	15	64	20	67	13	58
4	7	5	33	7	31	10	45	10	53	11	40
5	15	5	62	10	52	15	39	20	43	13	34
7	8	5	20	7	35	10	9	10	8	9	8
8	20	5	76	10	49	15	63	20	29	13	58
10	10	5	35	7	62	10	89	10	106	11	44
11	25	5	99	10	82	15	83	20	98	13	74

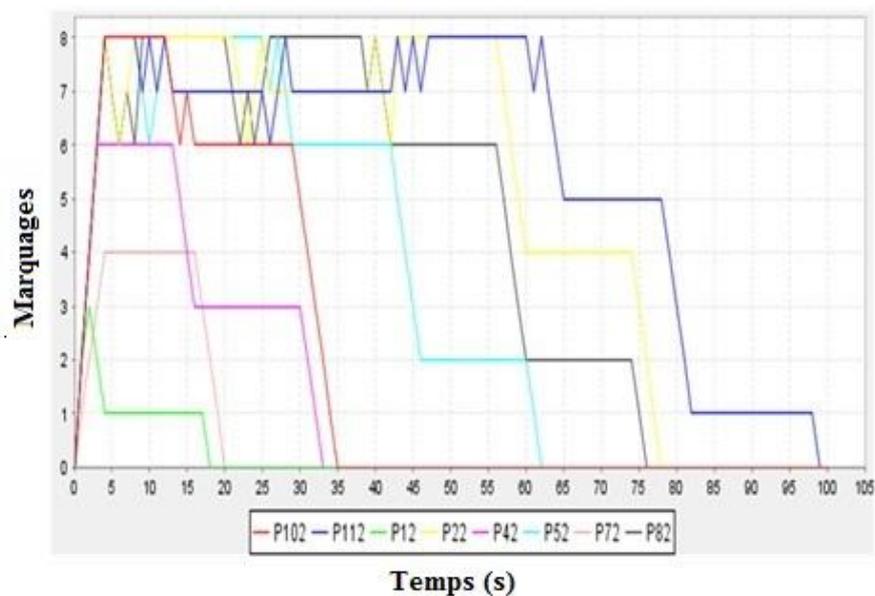


Figure 3. 5. Evolutions des marquages relatives à Sim 1.

Dans le premier cas, en utilisant la durée de feu vert de 5s, nous avons eu un temps total d'évacuation égal à 99 secondes.

Dans la deuxième étape, nous n'allons pas considérer pas la même durée d_{ij} pour tous les flux et nous allons distinguer les trois types de simulation: Sim 2 et Sim 3 cas a et cas b.

Etape 2 : Sim 2, Sim 3(a) et Sim 3(b)

Dans un premier temps, nous commençons par augmenter la durée du feu vert, soit 7 secondes pour les mouvements de « tourne à gauche » (flux 1/7 et flux 4/10) et 10 secondes pour les mouvements « tout droit » et « tourne à droite » (flux 2/8 et 5/11).

L'évolution de la marque, représentée sur la figure 3.6, montre que le temps d'évacuation total est passé de 99 à 82 s.

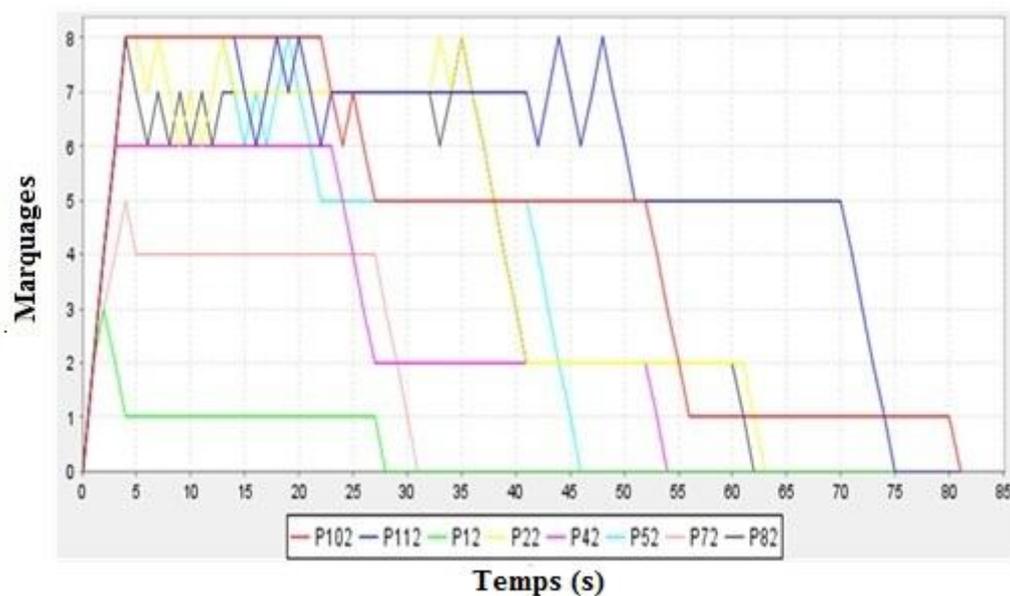


Figure 3. 6. Evolutions des marquages relatives à Sim 2.

Dans un second temps, en se basant sur une intersection réelle, nous pouvons remarquer que les taux d'arrivée des véhicules, dans les flux {1, 4, 7, 10}, sont inférieurs à ceux des flux {2, 5, 8, 11}. Pour cette raison, dans la simulation (Sim 3), nous commençons par fixer la durée du feu vert pour le dernier flux à 15 secondes dans le cas (a) et puis à 20 secondes dans le cas (b), les autres flux étant gardé à la durée de 10 secondes.

L'évolution du marquage, pour ces deux cas, Sim 3(a) et Sim 3(b), est présentée sur les figures 3.7 et 3.8.

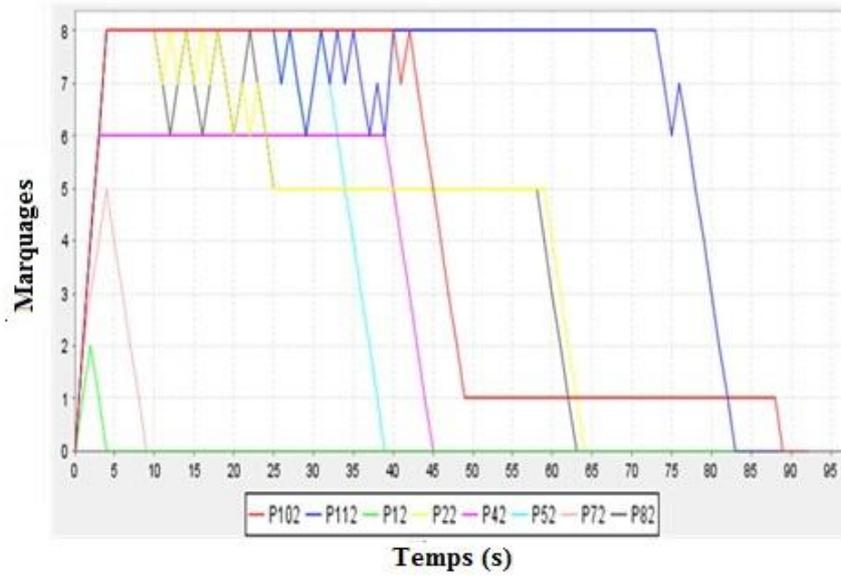


Figure 3. 7. Evolutions des marquages relatives à Sim 3 (cas a).

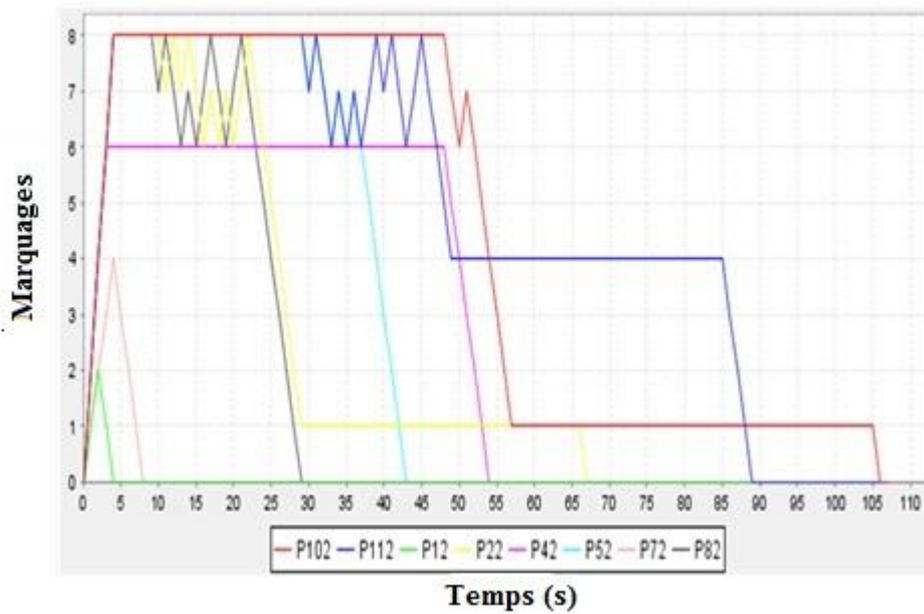


Figure 3. 8. Evolutions des marquages relatives à Sim 3 (cas b).

La simulation (Sim 3) montre clairement que l'augmentation de la durée de feu vert, ne mène pas toujours à la minimisation du temps d'évacuation, et qu'il en est de même pour les simulations Sim 3 (cas a et b). Le temps d'évacuation passe de 89 à 106 s.

Etape 3 : Mise en œuvre des heuristiques proposées pour le calcul du temps d'évacuation

Dans la dernière étape, et pour la dernière simulation, nous utilisons l'approche heuristique que nous avons proposée pour déterminer le temps d'évacuation.

Cette approche est basée sur l'estimation du nombre de véhicules qui entrent dans le carrefour durant un cycle. Nous obtenons les évolutions des marquages présentées dans la figure 3.9. Nous pouvons constater que l'heuristique proposée a permis de réduire considérablement le temps d'évacuation total, puisqu'il passe à 74s.

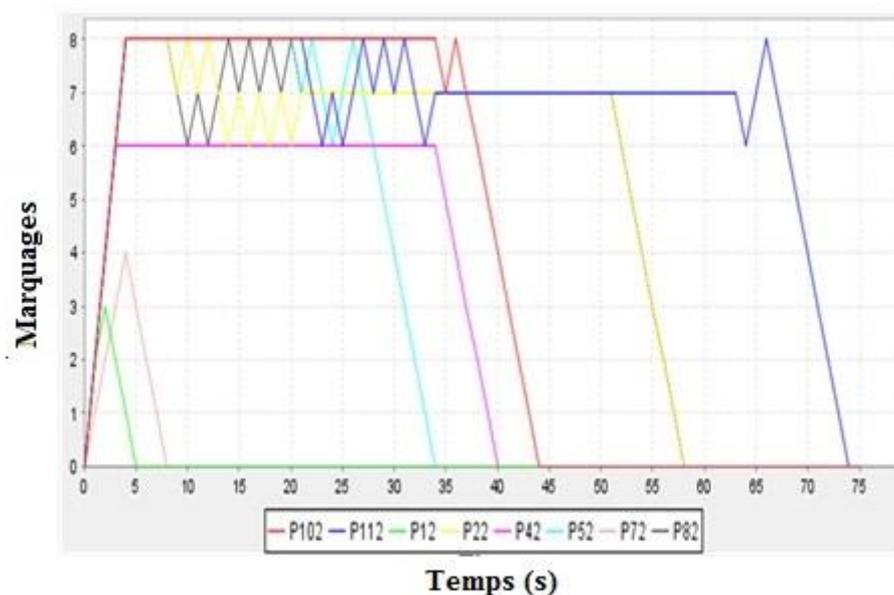


Figure 3. 9. Evolutions des marquages relatives à Sim 4.

Etape 4 : Influence de Nbv sur le temps d'évacuation total

Afin de préciser la robustesse et l'efficacité de l'approche proposée, nous avons réalisé d'autres simulations en variant le paramètre Nbv , présentées dans le tableau 3.6. Nous pouvons remarquer que notre approche donne un résultat intéressant puisqu'elle réduit le temps total d'évacuation.

Dans la Figure 3.10 et le tableau 3.6, nous présentons les résultats pour différentes capacités de flux et nous pouvons voir que, pour tous les cas considérés, notre heuristique donne les meilleurs résultats relatifs à Sim 4.

Nous avons effectué d'autres essais pour valider notre approche, en augmentant le nombre de véhicules dans l'intersection; cinq scénarii sont considérés pour *Nbv* de 500 à 5000 véhicules, tableau 3.6. Cinq essais ont été réalisés, 4 pour différents temps de feu vert et le dernier en utilisant notre heuristique qui a conduit aux meilleurs résultats.

Tableau 3. 6. Temps d'évacuation total

Nb_Vehicles	Sim 1	Sim 2	Sim 3 (case a)	Sim 3 (case b)	Sim 4 Approche proposée
Nbv 500	394	373	302	317	229
Nbv 750	661	529	494	513	471
Nbv 1000	814	624	622	638	570
Nbv 2500	2357	1569	1767	1468	1401
Nbv 5000	4763	3173	3645	3298	2766

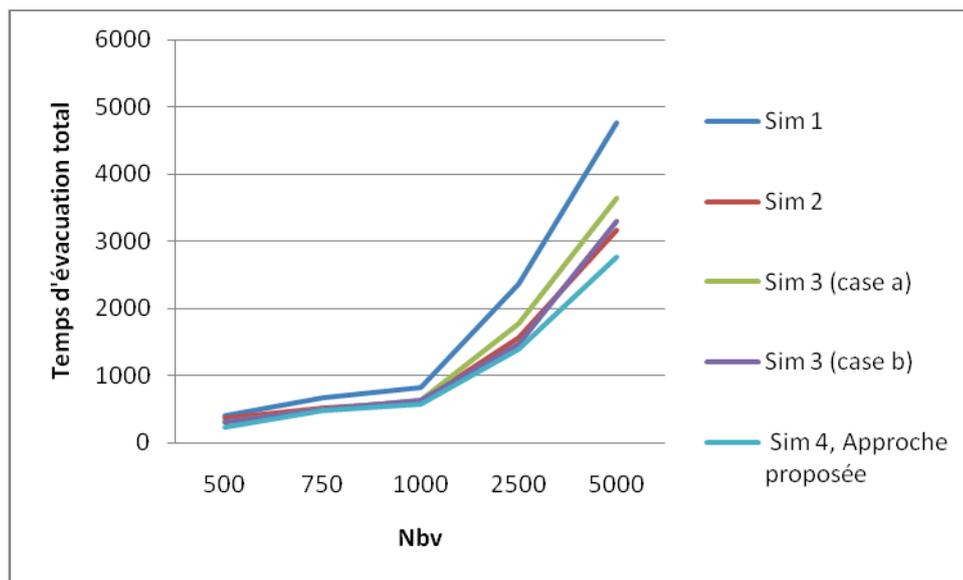


Figure 3. 10. Comparaison des résultats pour différents nombres de véhicules

Nous avons remarqué que notre heuristique a donné de meilleurs résultats pour les cinq scénarii traités, de même, lorsque le nombre de véhicule augmente, l'écart de minimisation entre les autres simulations et l'approche proposée augmente aussi.

Les résultats sont plus remarquables pour les carrefours à forte congestion.

3.4. Stratégies proposées pour la détermination des temps d'attente accumulés par les véhicules

Le premier défi a consisté à calculer la durée optimale du cycle et la minimisation du temps d'évacuation total. La durée du cycle pose le dilemme suivant: la capacité de l'intersection augmente lorsque la durée du cycle augmente (Kutz, 2004). Cependant, un temps de cycle trop long suppose des temps d'attente importants.

C'est pour cela que nous allons nous concentrer, dans cette partie, sur la minimisation des temps d'attente au niveau des carrefours.

3.4.1. Stratégie de calcul des temps d'attente proposée par combinaison de cycles à phases variables

Les retards dus aux files d'attente sont modélisés en fonction des durées de vert écoulées depuis la dernière commutation, des départs d'un tronçon et des taux de mouvements tournant à gauche.

Dans le cas d'une coordination entre les carrefours, la dernière variable modélisée est l'arrivée des véhicules sur une ligne de feu d'un carrefour.

Pour résoudre ce problème d'optimisation dynamique, est utilisée la programmation.

Le retard est une importante mesure de l'efficacité dans les études de trafic, car il présente le coût direct de la consommation de carburant et le coût indirect de la perte de temps pour les automobilistes.

Cependant, il constitue un paramètre difficile à estimer car il inclut le retard associé à la décélération en vue de s'arrêter, le retard d'arrêt et le retard associé à l'accélération à partir d'un arrêt. Cela est particulièrement vrai dans des conditions saturées de la demande de trafic, où les véhicules ralentissent et accélèrent en continu.

Il y a aussi les paramètres de temporisation du signal qui affectent l'efficacité de l'intersection dont la durée du cycle, le mouvement du temps vert et les intervalles de dégagement. L'augmentation du temps vert d'un mouvement de la circulation peut réduire son retard et le nombre de véhicules qui s'arrêtent. Toutefois, une augmentation du temps de vert à un mouvement vient, généralement, au détriment de ce retard et de l'arrêt d'un autre

mouvement. Ainsi, un bon plan de fréquence du signal est celui qui répartit le temps approprié en fonction de la demande à l'intersection et maintient la durée du cycle à un minimum.

L'inconvénient de la régulation des carrefours à feux avec le cycle fixe est clair du fait que la qualité de gestion du trafic au carrefour (sécurité et efficacité) ne dépend que d'un plan de feux fixé. Comme l'état de la circulation peut changer (heures de pointe du matin, accident,..), le cycle fixe peut être totalement inadapté à la circulation à ces périodes ; de plus, les embouteillages et les retards des véhicules seront aussi augmentés. Pour cette raison, nous avons pensé à des stratégies plus avancées, qui peuvent s'adapter automatiquement aux changements des circulations en utilisant des feux fixes car c'est la régulation la moins coûteuse.

Puisque les motifs de la demande changent au fil du temps, le plan de distribution de signal doit être périodiquement mis à jour pour assurer la sécurité et l'efficacité de l'intersection.

Supposons qu'un ensemble de véhicules s'est arrêté avant la zone de conflit à cause du feu rouge. Après le passage au feu vert, il faut quelques secondes pour que le conducteur du premier véhicule dans la file d'attente réagisse au feu et démarre. Cette période, est communément évaluée à environ 2 secondes (Robert, 2005), elle est appelée le temps perdu au démarrage (Gartner, 1991). Après le passage du quatrième véhicule dans la file d'attente, le débit tend à se stabiliser à celui de saturation qui est, généralement, maintenu jusqu'à ce que le dernier véhicule de la file d'attente quitte l'intersection. Le débit revient, enfin, au débit d'entrée des véhicules, avant de s'annuler au moment du temps de passage au feu rouge, c'est le temps perdu au dégagement (Garber, 1997).

Dans cette section, nous allons préciser l'approche de minimisation des temps d'attente au niveau de l'intersection que nous avons signalé précédemment. L'idée est d'utiliser l'approche de régulation à feux fixes et d'introduire des modifications selon le flux : donc au lieu de répéter un cycle choisi de temps vert plusieurs fois jusqu'à l'évacuation totale de tous les véhicules, nous choisissons de combinaison différentes durées pour caractériser les cycles fixes que nous fixons selon le taux de saturation dans le carrefour étudié, tableaux 3.7 et 3.8.

Tableau 3. 7. Cas d'un cycle à durées de phase fixes

Durée de phase (secondes)								
20	20	20	20	20	20	20	20	20
vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge	vert

Tableau 3. 8. Cas d'un cycle à durées de phase variables

Durée de phase (secondes)							
20	20	35	35	15	15	25	25
vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge	vert	rouge

Pour calculer le retard des véhicules au niveau de l'intersection étudiée, il faut d'abord déterminer la date d'arrivée de chaque véhicule a_i^k dans l'intersection par rapport à t_0 . C_i^k étant défini par le cycle des feux de circulation dans lequel le véhicule k arrive à la voie i , la date de début b_i^k de ce cycle C_i^k et la durée de feu vert θ_r pour chaque phase sont définies comme suit.

Comme nous avons 4 phases dans chaque cycle, le retard x_i^k de chaque véhicule k dans la voie i est donc calculé comme suit :

Phase 1

$$x_i^k = \begin{cases} 0 & \text{si } a_i^k \in [b_i^k, b_i^k + \theta_r] \\ b_i^k + 4\theta_r - a_i^k & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + \theta_r, b_i^k + 4\theta_r] \end{cases} \quad (3.10)$$

Phase 2

$$x_i^k = \begin{cases} b_i^k - a_i^k & \text{si } a_i^k \in [b_i^k, b_i^k + \theta_r] \\ 0 & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + \theta_r, b_i^k + 2\theta_r] \\ b_i^k + 4\theta_r - a_i^k & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + 2\theta_r, b_i^k + 5\theta_r] \end{cases} \quad (3.11)$$

Phase 3

$$x_i^k = \begin{cases} 0 & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + 2\theta_r, b_i^k + 3\theta_r] \\ b_i^k + 4\theta_r - a_i^k & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + 3\theta_r, b_i^k + 4\theta_r] \\ b_i^k + 2\theta_r - a_i^k & \text{si } a_i^k \in [b_i^k, b_i^k + 2\theta_r] \end{cases} \quad (3.12)$$

Phase 4:

$$x_i^k = \begin{cases} 0 & \text{si } a_i^k \in [b_i^k + 3\theta_r, b_i^k + 4\theta_r] \\ b_i^k + 3\theta_r - a_i^k & \text{si } a_i^k \in]b_i^k, b_i^k + 3\theta_r] \end{cases} \quad (3.13)$$

La commande de calcul des temps d'attente est réalisée par l'algorithme présenté ci dessus :

Initialisation $t = 0$; cost = 0 , delay=0

Tant que $t \leq T$ (Temps d'horizon) faire

Calculer le temps restant Δt avant la fin de la phase en cours

Calculer les longueurs des files d'attente à l'instant $t + \Delta t$

Pour chaque voie i

Pour chaque véhicule k ($k \in [1 \dots Nbv_i]$)

si ($a_i^k < t + \Delta t$) alors $delay = delay + x_i^k$

Mise à jour : $t = t + \Delta t$

Lancer la transition discrete Te_{ij}^h

End

3.4.1.1. Modèle RdPH du carrefour étudié

La modélisation du carrefour, en utilisant l'approche définie dans la section précédente, nécessite une modification au niveau du Réseau de Petri discret (feux d'intersection), car l'idée est d'utiliser une combinaison de différentes durées des cycles fixes à phases variable.

Comme nous l'avons déjà précisé, la représentation de ce carrefour se divise en deux parties, la première pour les flux d'arrivée et la seconde pour les feux de signalisations.

Nous commençons d'abord, par la première partie représentant la partie continue qui comporte quatre phases des flux compatibles (1,7),(2,8),(5,11) et (4,10)

Les transitions tr_i^0 permettent l'arrivage des véhicules avec différents temps d'arrivée, dans les places P_{i1} qui représentent respectivement le nombre des véhicules s'approchant du carrefour issus des flux i . Les places P_{i3} représentent le nombre de places disponibles des voies i dans le carrefour, les places P_{i2} les véhicules s'appêtant à traverser le carrefour et les places P_{lights}^{ij} les durées de feu vert dans les voies $\{i, j\}$.

La seconde partie, commence par deux places : les places P_{lights}^{ij} déjà défini et les places P_{ij}^1 activant le feu vert avec une durée d_{ij} qui correspond à l'une ou l'autre des transitions T_{ij}^k ; les places P_{ij}^{0k} pour maintenir la durée d_{ij} choisie pour les voies $\{i, j\}$, et enfin une transition Te_{ij}^k représente la fin de la phase du feu vert et activer les places P_{ij}^{1k} pour connecter deux phases avec la même durée d_{ij} pour les voies $\{i, j\}$. La durée d_{ij} est choisie parmi le nombre de possibilité des durées de cycles de feu vert $k \in [1...n]$.

La modélisation du carrefour sera donc comme suit, figure 3.11 et figure 3.12.

La partie réseau de Petri continu est représenté par les places et transitions suivantes:

P_{i1} : véhicules arrivant sur le flux i ,

P_{i2} : véhicules présents sur le tronçon du $i^{\text{ème}}$ flux,

P_{i3} : places disponibles sur le flux i ,

P_{lights}^{ij} : durée de feu vert dans les voies $\{i, j\}$,

T_{i1} : véhicules de la voie i entrant dans l'intersection,

T_{i2} : véhicules de la voie i sortant de l'intersection,

tr_i^0 : véhicules arrivant sur la $i^{\text{ème}}$ voie avec différents temps d'arrivée.

Le trafic routier dans le réseau de Pétri discret considéré est représenté par les places et les transitions définies comme suit :

P_{lights}^{ij} : feu vert accordé aux flux $\{i, j\}$,

P'_{ij} : place pour activer P_{lights}^{ij} avec une durée d_{ij} pour les voies $\{i, j\}$,

P_{ij}^{0k} : place pour maintenir la durée d_{ij} choisie pour les voies $\{i, j\}$,

P_{ij}^{lk} : place pour connecter deux phases avec la même durée d_{ij} pour les voies $\{i, j\}$,

T_{ij}^k : (transition immédiate) début de la phase du feu vert pour les voies $\{i, j\}$.

Te_{ij}^k : (transition immédiate) fin de la phase du feu vert pour les voies $\{i, j\}$.

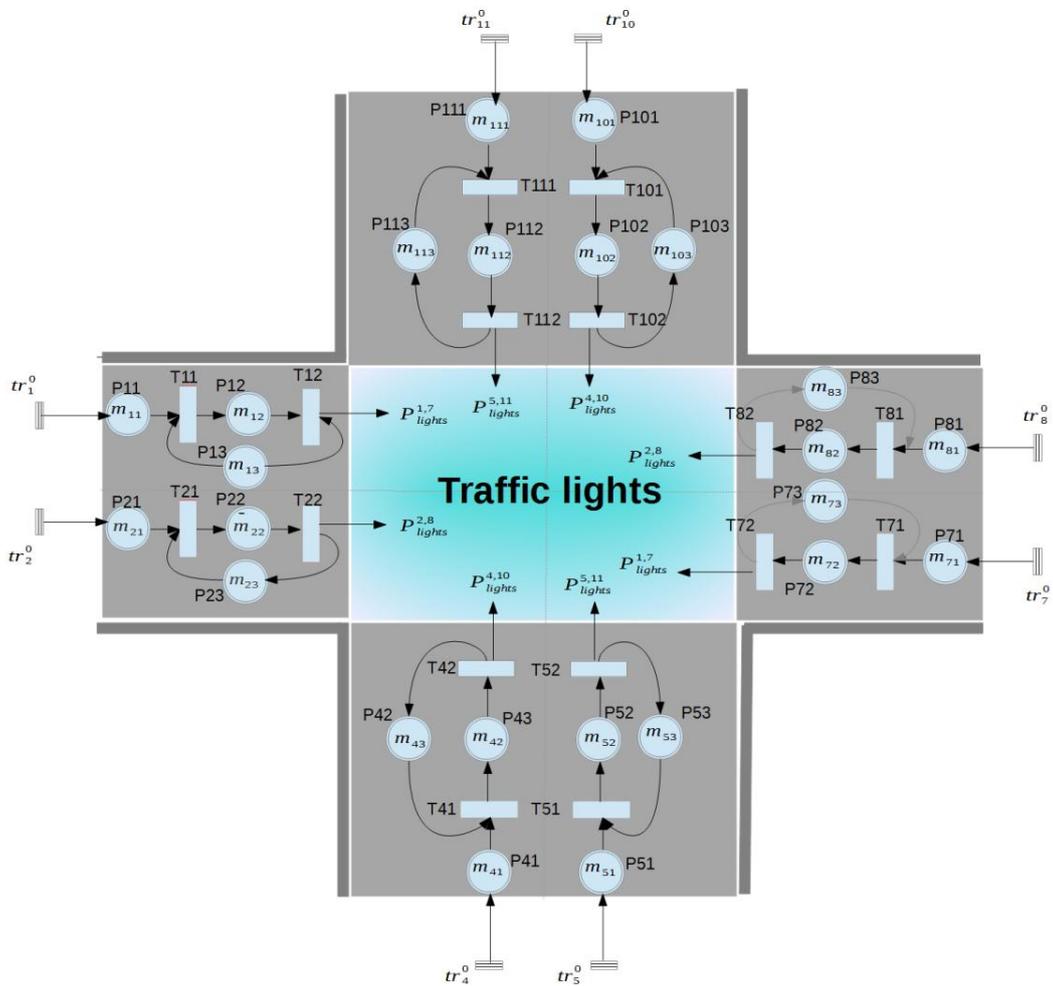


Figure 3. 11. Réseau de Petri continu proposé pour les flux à l'arrivée d'une d'intersection

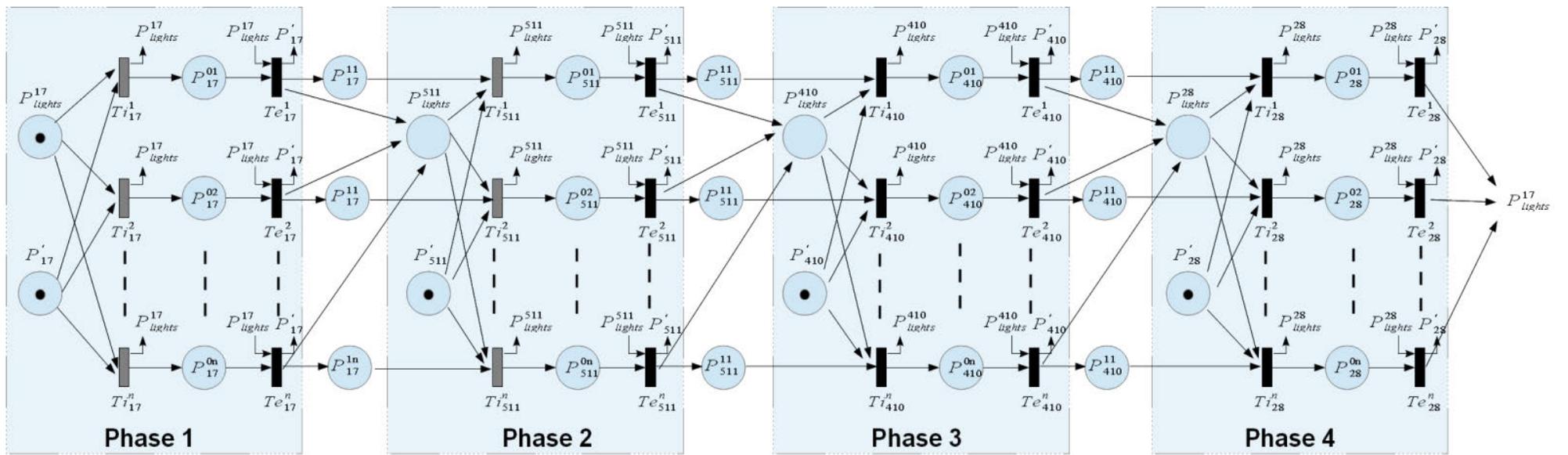


Figure 3. 12. Réseau de Petri discret proposé pour les feux de signalisation de l'intersection étudiée

3.4.1.2. Choix de base pour le calcul des temps d'attente

Choix des groupes de flux compatibles

Comme nous l'avons déjà précisé dans le premier chapitre, un carrefour se compose d'un certain nombre de routes (ou directions) et d'une zone de conflits (à l'intersection). Chaque direction peut être utilisée par plusieurs flux de véhicules.

Puisque nous avons différents choix de groupes de flux compatibles, nous allons utiliser, dans la partie suivante, paragraphe 3.4.2.1, les groupes de flux compatibles suivants : {1, 2}, {4, 5}, {7, 8} et {10, 11}, les flux de chaque groupe peuvent obtenir l'autorisation de traverser le carrefour simultanément.

Choix des temps de cycles et table des combinaisons possibles de ces cycles

Le trafic routier n'est pas homogène, il connaît des variations régulières dont les heures de pointes ou les retours de week-end, mais aussi, des variations aléatoires dont un événement sportif ou une déviation. Plusieurs méthodes permettent d'adapter le plan de feux à la réalité complexe de la circulation d'un carrefour.

Souvent, sont utilisés des plans de feux pré-calculés, en fonction des différentes configurations possibles du trafic. Ces solutions sont, généralement, utilisées pour les variations régulières du trafic par programmation. Le déclenchement d'un plan s'effectuant à heure fixe, impose que la variation régulière du cycle soit effectivement prévisible et de durée minimum de 15 minutes.

Afin de minimiser la somme des temps d'attente, des véhicules au niveau de l'intersection étudiée, nous allons, utiliser cette idée des feux pré-calculés, mais, nous allons utiliser trois valeurs de temps de cycle que nous combinons; i.e., au lieu de faire un enchaînement d'une même durée de cycle 60s pendant 15 min (60s, 60s, ..., 60s), nous allons combiner plusieurs valeurs relatifs à différents fonctionnements, afin de trouver la durée, qui correspond à la longueur de la file de véhicules.

Les durées que nous considérerons sont : 60s, 90s et 240s qui représentent, respectivement, les trois taux de saturation possibles dans une journée relatifs à un débit faible, un débit moyen et un débit important.

La combinaison de ces trois durées, conduit aux 27 possibilités introduites dans la figure 3.13.

tps =		
60	60	60
60	60	90
60	60	240
60	90	60
60	90	90
60	90	240
60	240	60
60	240	90
60	240	240
90	60	60
90	60	90
90	60	240
90	90	60
90	90	90
90	90	240
90	240	60
90	240	90
90	240	240
240	60	60
240	60	90
240	60	240
240	90	60
240	90	90
240	90	240
240	240	60
240	240	90
240	240	240

Figure 3. 13. Les 27 combinaisons des différents cycles

Observation du carrefour et collecte de données

Après observation du carrefour étudié et compte tenu des tableaux, 3.1, 3.2 et 3.3 qui représentent le nombre de véhicules arrivant dans ledit carrefour, nous allons diviser le taux d'arrivée en trois scénarios relatifs aux nombres de véhicules entrant au carrefour:

[0 et 32 véh], [0 et 80 véh] et [0 et 240 véh];

et avec un temps d'arrivée de chaque véhicule dans les quatre intervalles suivants :

[0 et 40s], [0 et 90s], [0 et 140s] ou [0 et 180s];

le temps d'arrivée maximum pour tous les véhicules est fixé à 180s, soit 3 min à partir de l'instant initial t_0 .

3.4.2. Mise en œuvre des résultats

3.4.2.1. Calcul des temps d'attente en utilisant la stratégie de combinaison à partir des durées des feux vert prédéfinies

Notons que le temps d'attente d'un véhicule dans un carrefour est considéré comme le temps de traversée jusqu'à ce que celui-ci quitte complètement le carrefour.

Le tableau 3.9, est tiré des trois tableaux 3.1, 3.2 et 3.3, du premier paragraphe 3.1.1 de ce chapitre, qui présentent le taux de véhicules entrant dans le carrefour avec les temps d'arrivée.

Tableau 3. 9. Nombre de véhicules arrivant dans l'intersection pour les 3 scénarii considérés

Taux de véh Tps d'arrivée	[0-32 véh]			[0-80 véh]			[0-240 véh]		
[0-40s]	27	13	22	66	50	77	196	226	173
[0-90s]	16	24	31	80	63	53	225	214	166
[0-140s]	28	27	22	51	64	65	153	224	196
[0-180s]	21	31	27	66	77	73	173	225	232

Pour chacune des combinaisons de cycles de la figure 3.13, nous allons calculer le retard de chaque véhicule en utilisant d'abord l'algorithme introduit dans la partie 3.2.3.1 de ce chapitre et la combinaison des cycles qui donne le meilleur temps d'attente en utilisant des durées de feu prédéfinies et, ensuite, des heuristiques proposées.

Parmi les cas étudiés, nous ne présentons que les résultats de quatre simulations relatives aux simulations suivantes :

- 27 véhicules arrivant entre [0 et 40s],
- 80 véhicules arrivant entre [0 et 90s],
- 225 véhicules arrivant entre [0 et 90s],
- et 73 véhicules arrivant entre [0 et 180s],

Discussions des résultats obtenus en utilisant des durées de feu vert prédéfinies

Simulation 1

Les résultats de la première simulation, notée Sim 1, relative à 27 véhicules avec un temps d'arrivée dans l'intervalle [0 et 40s], sont consignés dans le tableau 3.10, tel que, par exemple, le 1^{er} véhicule arrivé à l'intersection est le véhicule, noté veh 1 qui est arrivé dans les flux {7, 8}, après un temps d'arrivée égal à 1s, à partir de l'instant initial.

Tableau 3. 10. Temps d'arrivée des véhicules dans l'intersection
(simulation 1 avec 27 véhicules)

	veh 1	veh 2	veh 3	veh 4	veh 5	veh 6	veh 7	veh 8
flux {1,2}	3	10	11	12	27	28	28	39
flux {4,5}	9	14	27	32	34			
flux {7,8}	1	1	16	17	19	25	28	37
flux{10,11}	2	13	19	19	31	32		

Dans ce cas, l'algorithme du paragraphe 3.4.1, nous a conduit aux résultats de calcul des retards, ou temps d'attente, pour les quatre groupes de flux {1, 2}, {4, 5}, {7, 8} et {10, 11}, tableau 3.11 et figure 3.14, *comb i* correspondant aux 27 combinaisons, *Tretard* correspond au temps d'attente de chaque groupe de flux {i, j} et *Tsomme* la somme de temps d'attente calculé pour tous les groupes de flux compatibles.

Tableau 3. 11. Temps d'attente calculés
(simulation 1 avec 27 véhicules)

	comb 1	comb 2	comb 3	comb 4	comb 5	comb 6	comb 7	comb 8	comb 9	comb 10	comb 11	comb 12	comb 13	comb 14
Tretard flux{1,2}	118	118	118	118	118	118	118	118	118	246	246	246	246	246
Tretard flux{4,5}	91	91	91	91	91	91	91	91	91	23	23	23	23	23
Tretard flux{7,8}	103	103	103	103	103	103	103	103	103	224	224	224	224	224
Tretard flux{10,11}	154	154	154	154	154	154	154	154	154	298	298	298	298	298
Tsomme	466	466	466	466	466	466	466	466	466	791	791	791	791	791

	comb 15	comb 16	comb 17	comb 18	comb 19	comb 20	comb 21	comb 22	comb 23	comb 24	comb 25	comb 26	comb 27
Tretard flux{1,2}	246	246	246	246	81	81	81	81	81	81	81	81	81
Tretard flux{4,5}	23	23	23	23	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Tretard flux{7,8}	224	224	224	224	336	336	336	336	336	336	336	336	336
Tretard flux{10,11}	298	298	298	298	424	424	424	424	424	424	424	424	424
Tsomme	791	791	791	791	881	881	881	881	881	881	881	881	881

Nous remarquons que, lorsque nous utilisons la stratégie de régulation avec la combinaison des trois valeurs de cycle 60, 90 et 240s, nous ne trouvons pas un résultat concret pour la première simulation avec un nombre de véhicules faible entrant dans l'intersection. Car, tous les véhicules sont évacués avant le début du deuxième cycle avec un temps d'attente T_{somme} égal à 466s.

Même si la stratégie a pu influencer certains groupes de flux, telle que, par exemple le groupe de flux {4,5}, le temps d'attente est réduit de 90 à 23 secondes et ceux relatifs aux combinaisons : comb 10 à comb 18, qui démarrent tous par le temps de cycle 90 secondes, figure 3.14.

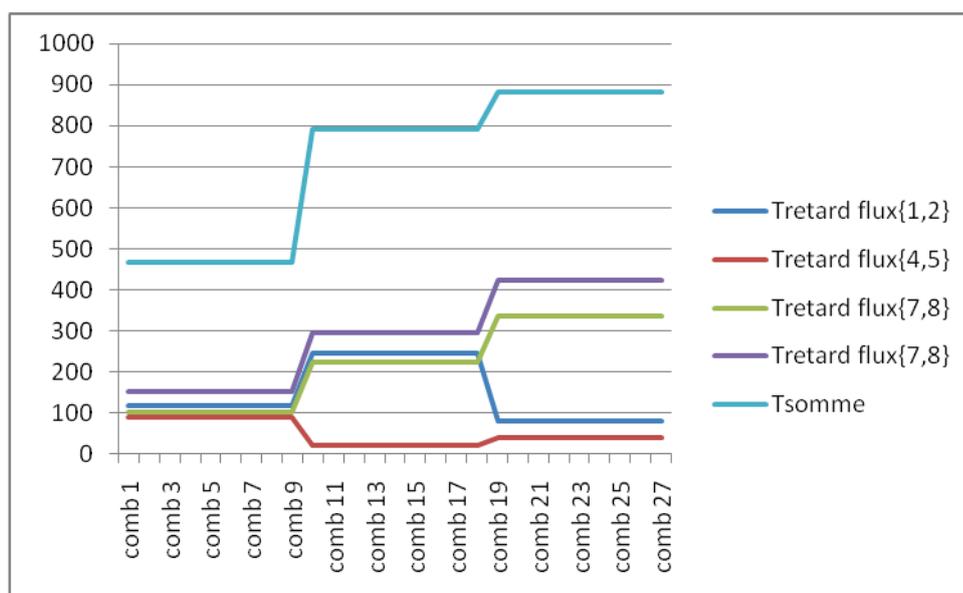


Figure 3. 14. Calcul des retards relatif aux 4 groupes de flux et à 27 véhicules

Simulations 2 et 3

Nous faisons, de même pour les simulations complexes avec un moyen et un fort débits relatifs à 80 et 225 véhicules, avec un temps d'arrivée dans l'intervalle [0 et 90s], les tableaux 3.12 et 3.13 présentent les résultats des calculs des temps d'attente des véhicules.

Tableau 3. 12. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 2 (80 véhicules)

	comb 1	comb 2	comb 3	comb 4	comb 5	comb 6	comb 7	comb 8	comb 9	comb 10	comb 11	comb 12	comb 13	comb 14
Tretard flux _{1,2}	361	361	361	320	320	320	320	320	320	620	620	620	620	620
Tretard flux _{4,5}	279	279	279	279	279	279	279	279	279	326	326	326	326	326
Tretard flux _{7,8}	271	271	271	271	271	271	271	271	271	350	350	350	350	350
Tretard flux _{10,11}	339	339	339	339	339	339	264	264	264	485	485	485	485	485
Tsomme	1250	1250	1250	1209	1209	1209	1134	1134	1134	1781	1781	1781	1781	1781

	comb 15	comb 16	comb 17	comb 18	comb 19	comb 20	comb 21	comb 22	comb 23	comb 24	comb 25	comb 26	comb 27
Tretard flux _{1,2}	620	620	620	620	920	920	920	920	920	920	920	920	920
Tretard flux _{4,5}	326	326	326	326	508	508	508	508	508	508	508	508	508
Tretard flux _{7,8}	350	350	350	350	411	411	411	411	411	411	411	411	411
Tretard flux _{10,11}	485	485	485	485	852	852	852	852	852	852	852	852	852
Tsomme	1781	1781	1781	1781	2691	2691	2691	2691	2691	2691	2691	2691	2691

Tableau 3. 13. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 3 (225 véhicules)

	comb 1	comb 2	comb 3	comb 4	comb 5	comb 6	comb 7	comb 8	comb 9	comb 10	comb 11	comb 12	comb 13	comb 14
Tretard flux _{1,2}	1175	1175	1175	1166	1166	1166	837	837	837	1747	1747	1747	1747	1747
Tretard flux _{4,5}	780	780	780	780	780	780	780	780	780	1742	1742	1742	1742	1742
Tretard flux _{7,8}	1037	1037	1037	1037	1037	1037	1037	1037	1037	1762	1762	1762	1762	1762
Tretard flux _{10,11}	1105	1105	1105	925	925	925	865	865	865	1226	1226	1226	1226	1226
Tsomme	4097	4097	4097	3908	3908	3908	3519	3519	3519	6477	6477	6477	6477	6477

	comb 15	comb 16	comb 17	comb 18	comb 19	comb 20	comb 21	comb 22	comb 23	comb 24	comb 25	comb 26	comb 27
Tretard flux _{1,2}	1747	1747	1747	1747	2161	2161	2161	2161	2161	2161	2161	2161	2161
Tretard flux _{4,5}	1742	1742	1742	1742	1939	1939	1939	1939	1939	1939	1939	1939	1939
Tretard flux _{7,8}	1762	1762	1762	1762	1448	1448	1448	1448	1448	1448	1448	1448	1448
Tretard flux _{10,11}	1226	1226	1226	1226	2097	2097	2097	2097	2097	2097	2097	2097	2097
Tsomme	6477	6477	6477	6477	7645	7645	7645	7645	7645	7645	7645	7645	7645

Les figures 3.15 et 3.16 présentent les temps d'attente des véhicules relatifs à 80 et 225 véhicules avec un temps d'arrivée dans l'intervalle [0, 90s].

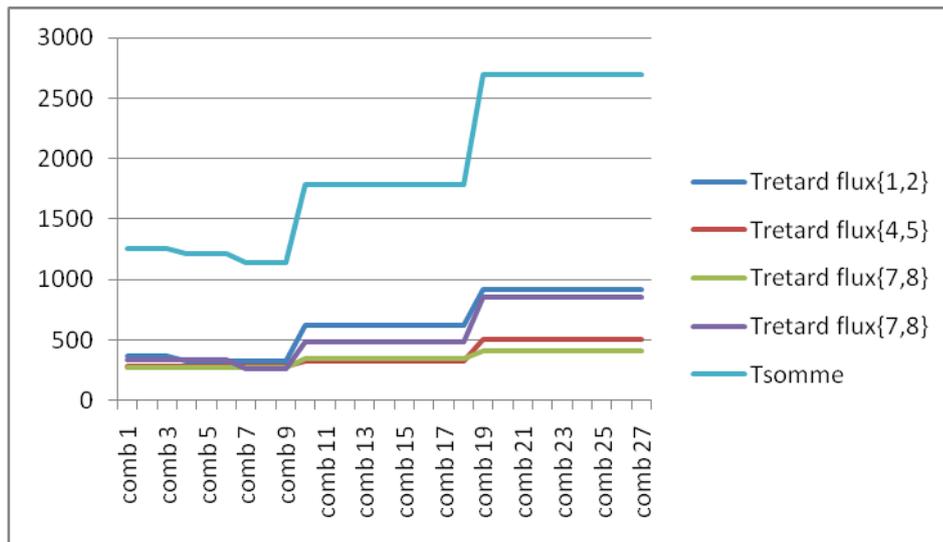


Figure 3. 15. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 80 véhicules

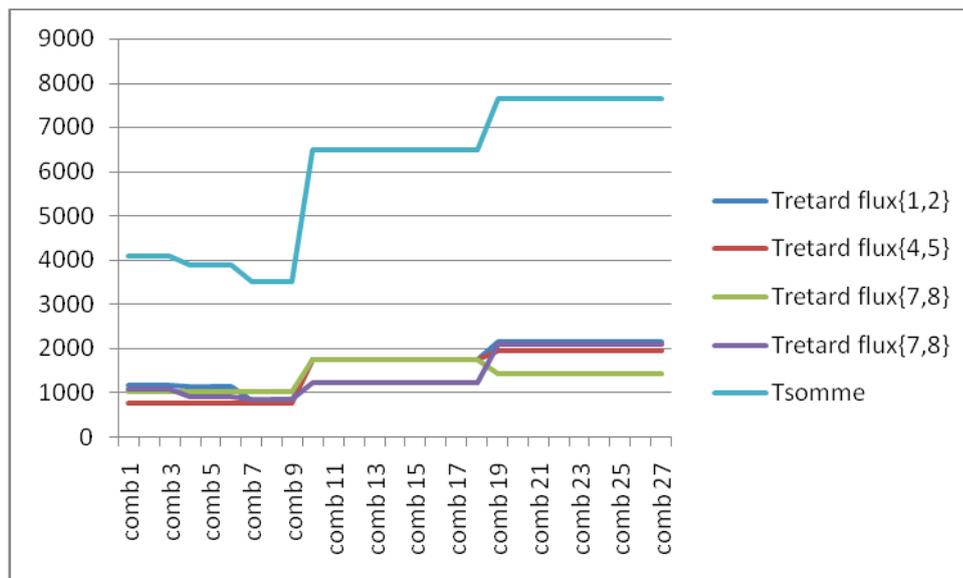


Figure 3. 16. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 225 véhicules

Après ces deux simulations, l'approche proposée permet de déterminer la meilleure combinaison pour l'optimisation des retards.

Par exemple, pour obtenir un temps de retard minimum dans les simulations 2 et 3 relatives à un nombre de véhicule égale à 80 et 225 véhicules, nous utilisons les temps de cycle [60, 240, 60], [60, 240, 92] ou [60, 240, 240] correspondant de comb7 à comb9 de *Tsomme*, ou le temps d'attente est minimisé de 1250 à 1134 secondes pour la simulation 2

(soit une différence de 2 min), et de 4097 à 3519 secondes pour la simulation 3 (soit une différence de 10 min), figure 3.17, représente les temps d'attente des 3 premières simulations.

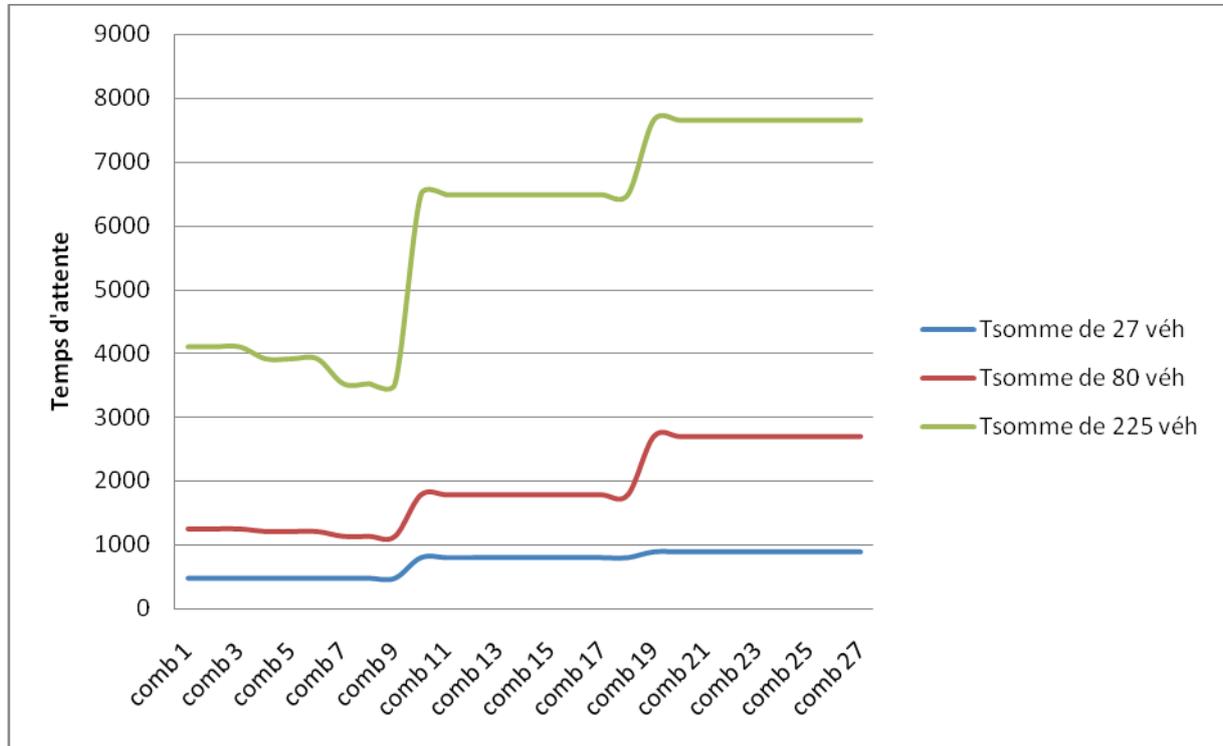


Figure 3. 17. Retards comparés des 3 premières simulations

Ces, 3 simulations étudiées, nous constatons que notre stratégie a donné de meilleurs résultats.

Simulation 4

Pour le cas de 73 véhicules, figure 3.18, avec un temps d'arrivée dans l'intervalle [0 - 180s], nous remarquons que la meilleure combinaison des temps de cycle est [60, 60, 240] correspondante à comb 3 avec un temps d'attente réduit de 1366 à 1190s (soit une différence de 3 min), le temps d'attente relatif à la simulation 4 étant présenté dans le tableau 3.14 et la figure 3.18.

Tableau 3. 14. Temps d'attente calculés dans le cas de la simulation 4 (73 véhicules)

	comb 1	comb 2	comb 3	comb 4	comb 5	comb 6	comb 7	comb 8	comb 9	comb 10	comb 11	comb 12	comb 13	comb 14
Tretard flux{1,2}	320	352	380	458	458	458	513	513	513	400	400	400	448	448
Tretard flux{4,5}	346	236	179	241	241	241	448	448	448	424	424	424	653	653
Tretard flux{7,8}	388	319	319	523	523	523	445	445	445	329	329	329	438	438
Tretard flux{10,11}	312	312	312	393	393	393	179	179	179	613	613	613	548	548
Tsomme	1366	1219	1190	1615	1615	1615	1585	1585	1585	1766	1766	1766	2087	2087

	comb 15	comb 16	comb 17	comb 18	comb 19	comb 20	comb 21	comb 22	comb 23	comb 24	comb 25	comb 26	comb 27
Tretard flux{1,2}	448	532	532	532	675	675	675	707	707	707	735	735	735
Tretard flux{4,5}	653	766	766	766	727	727	727	617	617	617	565	565	565
Tretard flux{7,8}	438	329	329	329	584	584	584	539	539	539	548	548	548
Tretard flux{10,11}	548	548	548	548	684	684	684	684	684	684	684	684	684
Tsomme	2087	2175	2175	2175	2670	2670	2670	2547	2547	2547	2532	2532	2532

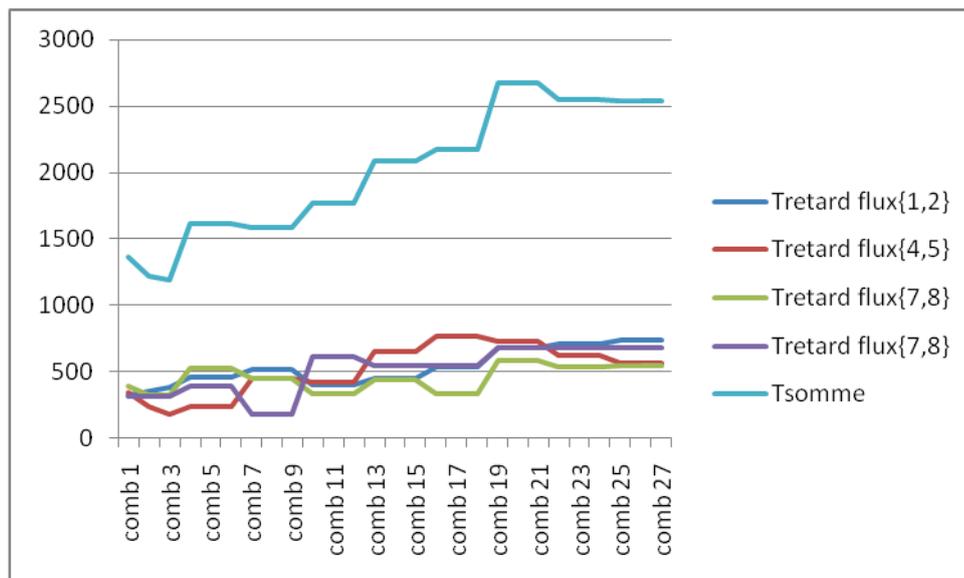


Figure 3. 18. Retards relatifs aux 4 groupes de flux et à 73 véhicules

Nous avons fait une réduction par rapport au temps 60 secondes ou encore avec le temps de cycle 90 secondes, utilisé par les principaux systèmes de régulation constructeurs, présents sur le marché français comme Siemens, CGA et GERTRUDE, qui nous donne un temps de retard égale à 1366s pour 60s et 2087s 90s. L'approche utilisée nous a permis d'optimiser le temps d'attente puisque nous avons trouvé un temps de 1190s, figure 3.18.

Les quatre simulations étudiées, ont montré que, notre stratégie a donné les meilleurs résultats.

3.4.2.2. Calcul des temps d'attente en utilisant la stratégie de combinaison de cycles à partir de l'heuristique proposée

Durant les différentes simulations, effectuées précédemment, nous avons remarqué que lorsqu'on utilise des temps de cycles importants, la durée 240 secondes par exemple, au démarrage de l'algorithme, le temps d'attente de l'intersection augmente.

Pour remédier à ce problème, nous envisageons de calculer une nouvelle durée de cycle, que l'on note d_{cij} , par la deuxième heuristique proposée, introduite au paragraphe 3.2.2.4 de ce chapitre, pour la minimisation du temps d'évacuation au niveau du carrefour.

La durée de cycle d_{cij} , est quatre fois de la durée d_{2ij} , calculée par la deuxième heuristique, vu qu'on quatre phases, soit :

$$\forall (i, j) \in \{(1, 2), (4, 5), (7, 8), (10, 11)\}$$

$$d_{cij} = 4d_{2ij}$$

$$d_{cij} = 4 \left(\frac{\left(\sum_{k=1}^{IL} Nbv_k \right) t_c}{IL} + t_d \right)$$

avec :

IL : le nombre de voies d'entrée dans le carrefour,

Nbv_k : le nombre de véhicules dans chaque IL,

t_d : le temps de démarrage du véhicule à l'intersection,

t_c : la durée de franchissement du carrefour.

Discussions des résultats obtenus en utilisant la deuxième heuristique proposée

Pour améliorer notre stratégie de régulation, nous allons remplacer la durée de temps 240 s par la nouvelle valeur d_{cij} , à calculer par l'heuristique proposée.

Cas d'un débit faible

D'abord, pour valider cette approche, nous allons faire 3 simulations avec un nombre de véhicules qui ne dépasse pas les 32 véhicules, le temps d'arrivée étant dans l'intervalle [0 – 40s].

Les figures 3.19, 3.20 et 3.21, sont relatives aux 3 simulations 1, 2 et 3 pour les nombres de véhicules arrivant dans l'intersection respectivement égaux à 27, 13 et 22 véhicules.

Si nous utilisons l'heuristique 2 élaborée, les temps de cycles deviennent, respectivement, égaux à 17.5, 10.5 et 15s.

Pour chaque simulation, nous allons remplacer la valeur 240s dans la table des combinaisons, par ces nouvelles valeurs des temps de cycle. T_{appr} est le temps d'attente calculé par l'heuristique 2 proposée.

Comme le montre les figures 3.19, 3.20 et 3.21, la stratégie a été testée et validée, avec succès, en réduisant les retards de 466 à 172.125s pour la 1ère simulation, de 290 à 42.75s et de 327 à 73s pour la 2ème et la 3ème simulations, figure 3.20.

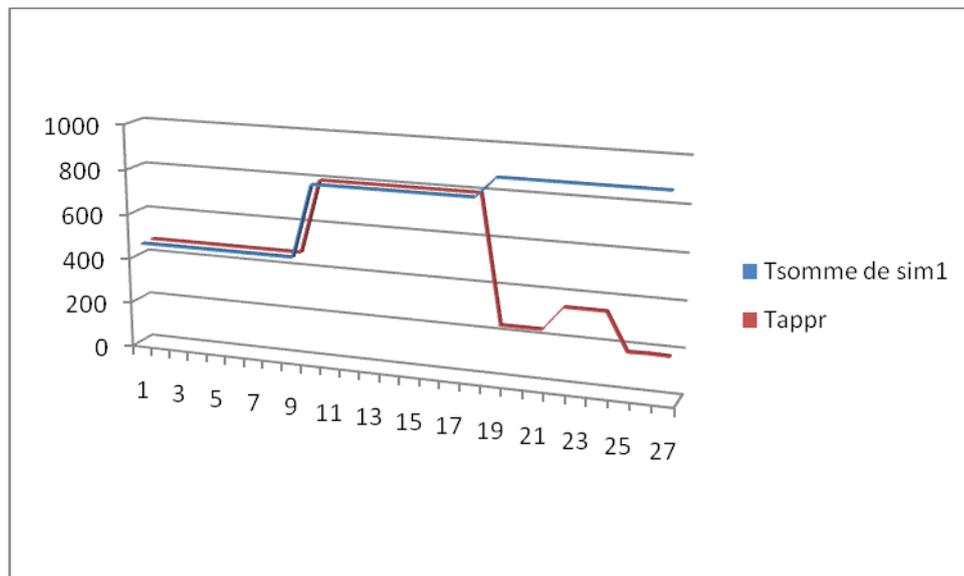


Figure 3. 19. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij} pour le cas de 27 véhicules pour la simulation 1

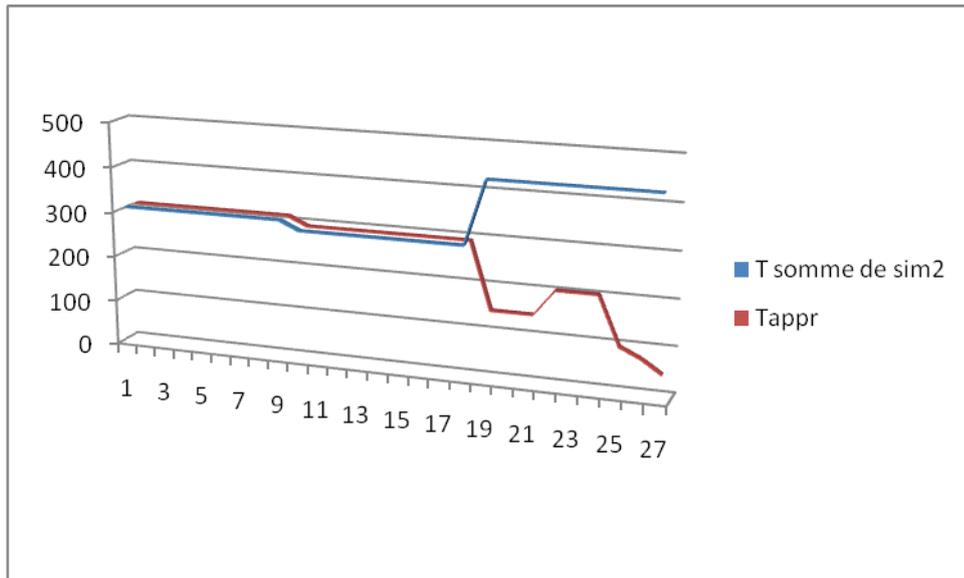


Figure 3. 20. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij} pour le cas de 13 véhicules pour la simulation 2

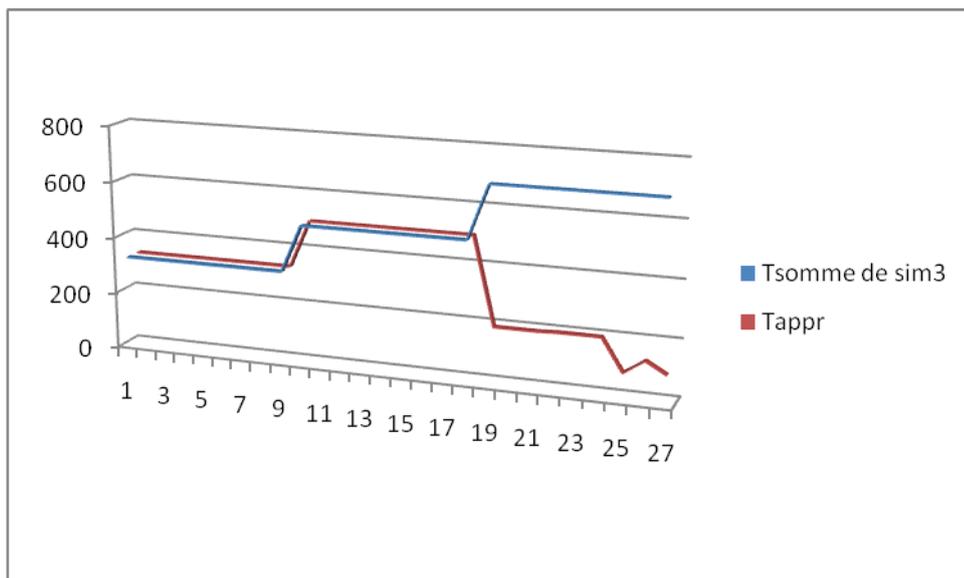


Figure 3. 21. Comparaison entre les 2 stratégies en utilisant 240s et d_{cij} pour le cas de 21 véhicules pour la simulation 3

Pour mieux comparer les deux stratégies : les combinaisons en utilisant l'heuristique et les combinaisons à cycle fixes, nous allons prendre le temps d'attente minimum trouvé en utilisant les cycles de feu prédéfinis et le comparer avec celui trouvé en utilisant l'heuristique 2, figure 3.22.

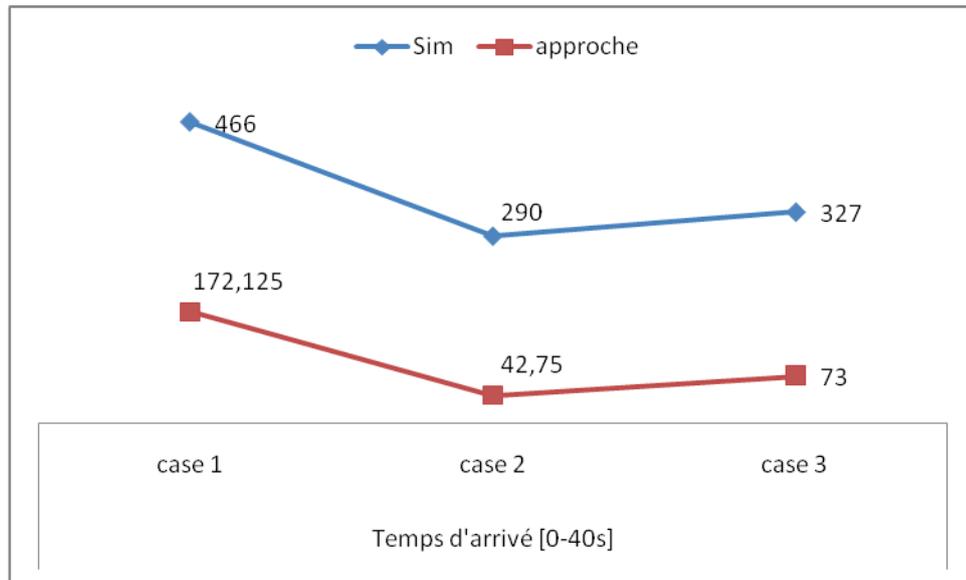


Figure 3. 22. Comparaison entre les 2 stratégies considérées

Cas d'un débit important

Dans cette partie, nous allons augmenter les flux de véhicules arrivant à l'intersection jusqu'à 240 ainsi que le temps d'arrivée jusqu'à 90 secondes. C'est-à-dire nous allons reprendre les cas des nombres de véhicules entrant dans l'intersection dans les intervalles [0-32véh], [0-80véh] et [0-240véh], avec des temps d'arrivée dans les intervalles [0-40s] et [0-90s]

Pour chaque nombre d'arrivées dans les intervalles à partir [0-32véh], [0-80véh] et [0-240véh], nous trouvons 6 cas, 3 entre [0-40s] et 3 entre [0-90s].

Nous allons, donc reprendre l'étude à partir des valeurs dans le tableau 3.15, extraites du tableau 3.9. Les résultats sont comparés avec les stratégies des principaux systèmes de régulation Siemens, CGA et GERTRUDE, qui utilisent les temps de cycles 60 et 90 secondes,

Tableau 3. 15. Nombre de véhicules entrant dans l'intersection selon les scénarii

Taux de véh Tps d'arrivée	[0-32 véh]			[0-80 véh]			[0-240 véh]		
	[0-40s]	27	13	22	66	50	77	196	226
[0-90s]	16	24	31	80	63	53	225	214	166

Dans les tableaux 3.15, 3.16 et 3.17, nous avons utilisé notre stratégie de combinaison des cycles en utilisant la durée de cycle d_{cij} pour les 6 cas, on note le temps d'attente calculé par T_{appr} que nous avons comparé au temps de retard trouvé avec les stratégies des systèmes de simulation utilisant les durées 60 et 90s.

Tableau 3. 16. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 32 véhicules

	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5	cas 6
Tsim 60s	466	310	327	340	427	511
Tsim 90s	791	290	495	566	328	626
Tappr	172,125	42,75	73	83,875	69	164,375

Tableau 3. 17. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 80 véhicules

	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5	cas 6
Tsim 60s	1178	1076	1105	1156	1067	771
Tsim 90s	1763	1522	1732	1781	2268	1304
Tappr	651,5	451,25	845,5	692,875	1030	400,625

Tableau 3. 18. Comparaison entre les différentes stratégies relatives à 240 véhicules

	cas 1	cas 2	cas 3	cas 4	cas 5	cas 6
Tsim 60s	3255	3894	2763	3918	3072	2797
Tsim 90s	4997	6078	3929	6477	5383	4819
Tappr	3255	671,25	2763	3429,625	2619	2540,5

Nous remarquons que les résultats trouvés dans les trois tableaux, confirment la validation et l'importance de notre stratégie pour la minimisation des temps d'attente au niveau de l'intersection, avec une optimisation remarquable pour des flux faibles et un peu saturé. Ces résultats sont indiqués dans les figures 3.23 et 3.24.

Pour les flux saturés avec un taux d'arrivée supérieur à 150 véhicules, nous avons remarqués une amélioration ou des résultats de même ordre à ceux obtenus relatifs au temps de cycle de 60 secondes, figure 3.25.

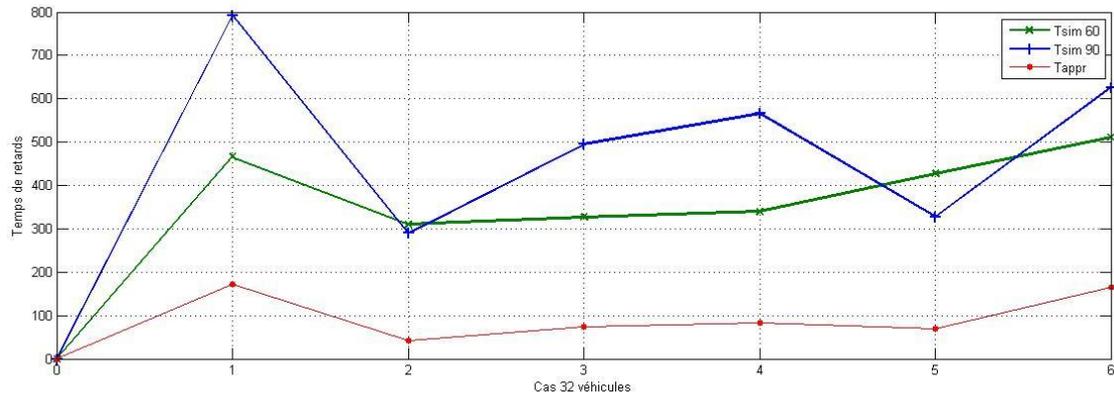


Figure 3. 23. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 32 véhicules

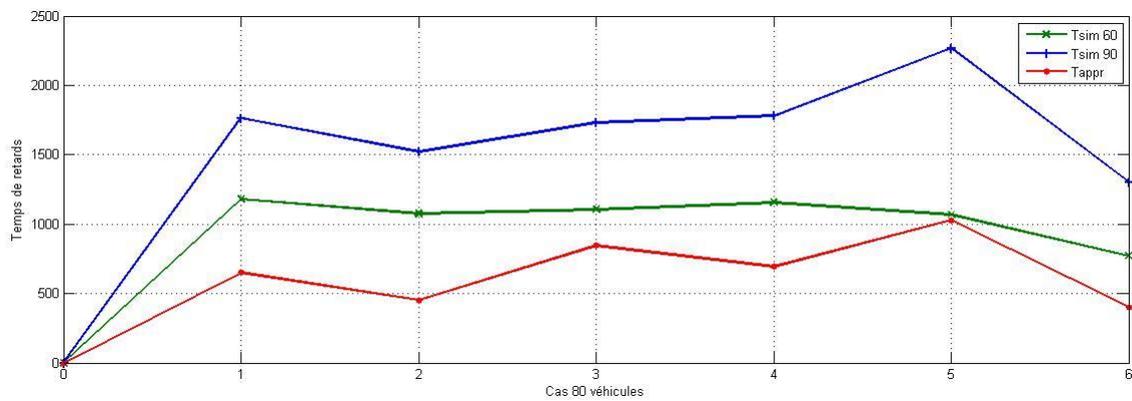


Figure 3. 24. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 80 véhicules

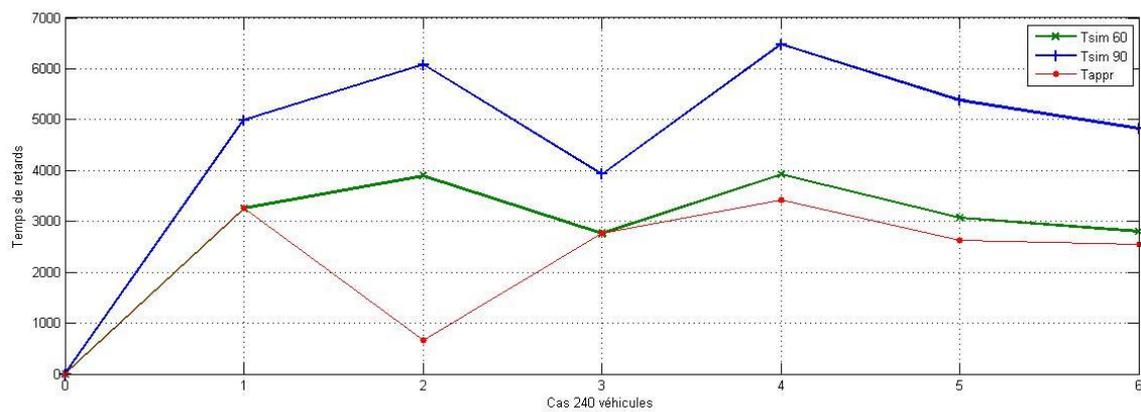


Figure 3. 25. Comparaison entre les 3 simulations relatives à 240 véhicules

Dans cette partie du chapitre, nous avons comparé les estimations des retards obtenus par notre stratégie de régulation et les stratégies de simulation déjà utilisés pour le cas d'un temps fixe dans une intersection signalisée à flux faible, moyen et saturé.

Globalement, nous avons trouvé que les retards calculés par les modèles existants d'analyse sont supérieurs à ceux simulés par notre stratégie utilisant l'heuristique 2 à l'exception des cas étudiés pour un taux d'arrivée qui atteint les 240 véhicules, qui a donné d'excellents résultats par rapport à la méthode Siemens qui utilise un temps de feux égal à 90 secondes et une légère optimisation des temps de retards par rapport à la méthode GERTRUDE, avec un temps de cycle égal à 60 secondes.

En conclusion, l'étude a illustré la validité du modèle pour l'optimisation des temps de retards au niveau de l'intersection à flux faible et même pour certains flux importants.

Alternativement, la stratégie est idéale pour la modélisation de ces applications réelles. Les résultats de cette étude fournissent beaucoup de crédibilité au modèle pour les évaluations de la vie réelle.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation par un RdP de l'intersection isolée à 4 voies étudiée aux niveaux microscopique et macroscopique. Afin de pouvoir élaborer des algorithmes de commande à partir de cette description microscopique, nous l'avons étendu aux RdP discrets, capables de donner fidèlement la durée du feu vert qui suit l'évolution du trafic en temps réel.

En premier lieu, nous avons considéré la possibilité de calcul des longueurs de files d'attente, après avoir décrit le système non linéaire par une base de modèles linéaires, activés séquentiellement. Nous avons pu déterminer l'importance de la durée de feu vert pour la minimisation des files d'attente au niveau du carrefour et fixer judicieusement les cycles de longues durées pour minimiser les arrêts au niveau du carrefour.

En second lieu, nous avons proposé une heuristique qui a permis de calculer la durée des feux verts en fonction de données caractérisant le carrefour étudié. Cette approche a été testée et validée, avec succès, pour la réduction du temps d'évacuation de tous les véhicules qui se trouvent dans le carrefour et du temps de retard accumulé par les véhicules entrant dans l'intersection.

Afin de permettre une analyse des performances des approches proposées, nous avons effectué des simulations et des comparaisons des résultats obtenus avec des commandes à cycles fixes, déjà utilisées par les algorithmes Siemens et GERTRUDE. Les résultats obtenus

sont encourageants dans le sens où le temps d'attente des véhicules au niveau du carrefour a été souvent réduit par l'heuristique proposée.

Conclusion générale

La plupart de méthodes développées, pour la régulation du trafic urbain au niveau des carrefours, cherche à réduire les temps d'attente et les longueurs des files d'attente. Ces méthodes se fixent principalement comme objectif à l'optimisation des cycles de feu sur un horizon fini. Une première catégorie de méthodes s'articule sur le calcul prédéterminé des cycles optimaux à partir d'un historique donné, alors qu'une seconde catégorie calculant les durées des feux en temps réel, en tenant compte des fluctuations du trafic se révèle performante et efficace surtout quand il s'agit d'un trafic non congestionné. Toutefois, pour utiliser celle-ci dans les périodes saturées comme pour les heures de pointe, il s'avère nécessaire d'introduire des notions de commande de feux basées sur des modèles qui tiennent compte de la congestion, quasi-quotidienne.

Partant de ces constats, après avoir défini les éléments de base qui caractérisent la régulation du trafic au niveau des intersections, nous avons présenté la problématique du trafic urbain ainsi que les causes de dysfonctionnements internes et externes du carrefour. Le travail bibliographique réalisé dans ce sens a montré que les méthodes existantes, pour la régulation du trafic au niveau des carrefours avec des véhicules autonomes, sont peu efficaces. Cela constitue un défi permanent pour la communauté scientifique pour la minimisation ou la réduction des problèmes liés à la congestion du trafic.

En effet, puisque chaque véhicule peut être traité comme un individu indépendant, qui a un temps d'arrivée et une durée de traversée dans la voie correspondante, la recherche pour une séquence de passage correspond à un problème d'optimisation. Comme il peut y avoir de nombreux véhicules dans un carrefour, le temps de calcul mis par l'algorithme relatif à la régulation du trafic peut devenir très élevé ; ce qui rend le problème initialement plus complexe.

Pour décrire la composition du flot de véhicules, nous avons opté pour une modélisation du trafic par les réseaux de Petri sur deux niveaux de représentation complémentaires : un niveau macroscopique et un niveau microscopique : le premier niveau décrit le flux de véhicules par des variables globales comme le débit, la vitesse et la densité et le deuxième niveau décrit le trafic d'une façon plus fine, en considérant les véhicules individuellement. Ces deux niveaux sont, respectivement, articulés sur les réseaux de Petri à vitesses variables et les réseaux de Petri discrets temporisés. Le comportement global du trafic est proposé pour

être décrit par un modèle hybride, exploité pour la régulation du trafic par la résolution de problèmes liés à la congestion. Il représente, simultanément, l'évolution continue des files d'attente et l'évolution discrète des feux tricolores. Dans le but de clarifier les interactions entre les dynamiques discrètes et continues, nous avons eu recours à une représentation en utilisant l'approche multimodèle qui consiste à décrire l'évolution du trafic dans le carrefour par un ensemble de modèles linéaires validés dans des domaines de fonctionnement particuliers, chacun de ces modèles caractérisant une situation du trafic.

Dans le cadre de notre travail, nous avons opté pour une nouvelle stratégie pour résoudre le problème de la régulation du trafic urbain en jouant sur les feux de signalisation. Nous nous sommes intéressé essentiellement à une stratégie permettant d'éviter, en premier lieu, la congestion et la sursaturation des files d'attente, qui ne doivent pas dépasser l'optimum des capacités des voies de l'intersection étudiée ; en second lieu, une approche est proposée pour réduire le temps d'évacuation des véhicules au niveau du carrefour et surtout pour la réduction des temps d'attente des conducteurs.

Pour calculer les longueurs des files d'attente, nous avons présenté un premier algorithme permettant d'utiliser d'abord l'approche multimodèle afin de montrer l'importance de la durée du feu vert pour la réduction de ce critère dans le carrefour. En plus du critère longueur de la file d'attente, les deux autres critères suivants, souvent retenus dans la régulation du trafic : le temps moyen d'attente et le temps total d'évacuation sont, également, considérés et appliqués par une heuristique de contrôle et une stratégie de régulation à feux fixe et à feux variables, ces deux régulations permettent de minimiser ces deux critères, suite à la détermination de la durée de feu vert correspondante à la situation de l'intersection en temps réel.

Afin de valider notre approche, nous avons réalisé une grande série d'instances de tailles et de types différents, en rapport avec le nombre des véhicules et de la configuration du carrefour.

Les résultats que nous avons obtenus dans le cas d'un carrefour isolé nous semblent prometteurs pour une application réelle. Il serait intéressant d'élargir le modèle RdPH à la modélisation des intersections plus complexes et de les valider par l'exploitation des données de terrain pour un réseau de carrefour.

Bibliographie

- (Bail, 1991).** Le Bail J., Alla H., David R., Hybrid Petri nets. Proc. of the European Control Conference, Grenoble 1991 , 1472-1477.
- (Bell, 1997).** Bell M.G.H., Iida Y., Transportation network Analysis. Editor John Wiley and Sons, 1997 .
- (Biham, 1992).** Biham O., Middleton A., Levine D., Self-Organisation and Dynamical Transition in Traffic Flow Models. Phys. Rev. A, Vol. 46, n° R6724 SCCS-348, 1992.
- (Boillot,1992)** Boillot F., Blossville J., Lesort J., Motyka V., Papageorgiou M. and Sellam S., Optimal signal control of urban traffic networks. 6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, London 1992, 75-79.
- (Boillot, 2002).** Boillot F., Midenet S., Pierrelée J.C., Real-life CRONOS evaluation. Proc. Of the 10th IEE International Conference on Road Traffic Information and Control, n°472, 2002. , 182-186.
- (Brams, 1983).** Brams G.W., Réseaux de Petri: Théorie et pratique. Tome 1: Théorie et analyse, Tome 2: Modélisation et application. Masson 1983.
- (Certu, 2002).** Certu Carrefour urbain guide. Aménagement et exploitation de la voirie, France 2002.
- (Champion, 2002).** Champion A., Zhang M.Y., Auberlet J.-M. et Espié S., Behavioural simulation : towards high-density network traffic studies. Proceedings of the Third International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS), Gungxi 2002 .
- (Chandler, 1958).** Chandler F.E., Herman R., Montroll E.W., Traffic dynamics: studies in car following. Operation Research, n°6, 1958. , 165-184.
- (Chen, 2007)** Chen S., Real-time traffic signal control for over-saturated networks. Ph.D. dissertation, Texas Tech University, 2007.
- (Cohen, 1990).** Cohen S., Ingénierie du trafic routier: éléments de théorie du trafic et applications. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990.
- (Correia, 2007).** Correia A., Modélisation de conflits dans l'algèbre des diodes. Application à la régulation de trafic dans les carrefours. Laboratoire Systèmes et Transport (SET), UTBM, 2007 Belfort.
- (Cremer, 1986).** Cremer M. et Ludwig J., A fast simulation model for traffic flow on the basis of boolean operations. Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 28, 1986, 297-303.

- (David, 2010).** David R., Alla H.. Discrete, continuous and hybrid Petri nets, Library of Congress Control, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- (David, 1992).** David R., Alla H., Du grafctet aux réseaux de Petri, Paris, Edition Hermés, 1992.
- (Delmotte, 1997)** Delmotte F., Analyse multimodèle, Thèse de Doctorat, Université de Sciences de Techniques de Lille, 1997.
- (Derai, 2014).** Derai S., Ghoul H. R., Alla H., Modélisation et controle d'un carrefour isolé à deux voies. European Scientific Journal. Edition Vol. 10, n° 12, 2014.
- (Di-Febrarro, 2004).** Di Febrarro A., Giglio D., Sacco N., Urban traffic control structure based on hybrid Petri nets. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 5, n° 4, 2004, 224-237.
- (Doniec, 2006).** Doniec A., Espié S., Mandiau R. et Piechowiak S., Simulation de trafic routier en carrefour : gestion des comportements et des priorités. In International Workshop Logistique & Transport, Hammamet 2006.
- (Dotoli, 2004).** Dotoli M., Fanti M.P., An urban traffic network model via coloured timed Petri Net. WODES, 7th Workshop on Discrete Event Systems, September, Reims 2004.
- (Dridi, 2012).** Dridi M., Sammoud B., EL Moudni A., Benrejeb M., Modélisation et régulation de trafic urbain : Application sur un carrefour à feux tricolores, Management et Ingenierie des Systèmes, Maroc, 2012.
- (Edie, 1958).** Edie L.C., Foote R.S.. Traffic flow in tunnels. Proc. Highway Research Board, Vol. 37, 1958, 334-344.
- (Edie, 1961).** Edie L.C., Car-Following and Steady State Theory for Non-Congested Traffic. Operation Research. Vol. 9, n°1, 1961.
- (Elloumi, 1994).** Elloumi N., Haj-Salem H., Papageorgiou M, METACOR: A Macroscopic Modelling Tool for Urban Corridor. Tristan II (Triennial Symposium on Transportation Analysis), Vol. 1, Capri 1994. , 135-150.
- (Espié, 2002).** Espié S., Approche multi-acteurs dans la simulation de trafic automobile. Organisation et applications des systèmes multi-agents,TRID 2002. , 259-278.
- (Evans, 2000).** Evans M., Hastings N., Peacock B., Statistical Distribution. Edition 3, Willey Publishing, 2000.

- (Robert, 2005).** Robert L., Gordon P.E., Warren P.E., Traffic control systems handbook, Dunn Engineering Associates and Siemens. Intelligent Transportation Systems, 2005.
- (Fukui, 1996).** Fukui M., Ishibashi Y., Traffic Flow in 1D Cellular Automata Model Including Cars Moving with High Speed. J. Phys. Soc. Vol. 65, 1996, 1859-1870.
- (Garber, 1997).** Garber, N.J. et L.A. Hoel, Traffic and Highway Engineering, PWS Publishing Company. Boston, 1997.
- (Gartner, 1991).** Gartner N.H., Tarnoff P.J. and Andrews C.M., Evaluation of the Optimized Policies for Adaptive Control (OPAC) Strategy,. Transportation Research Record, 1324, 1991, 105-114.
- (Gazis, 1959).** Gazis D.C., Herman R., Potts R.B., Car Following Theory of Steady State Traffic Flow. Operation Research. Vol 7, n°4, 1959, 499-505.
- (Gazis, 1961).** Gazis D.C., Herman R., Rothery R.W., Nonlinear Car Follow-the-leader. Models of traffic flow. Operation research, Vol. 9, n°4, 1961, 545-567.
- (Gerlough, 1956).** Gerlough D.L.. Simulation of freeway traffic by an electronic computer. Transportation Research Board, Vol. 35, Washington DC, 1956. , 543-547.
- (Greenshields, 1935).** Greenshields B.D. A Study of Traffic Capacity. Highway Research Board Proceedings, 1935, 448-477.
- (Hansen, 2000).** Hansen B.G., Martin P.T., Perrin H.J., SCOOT real-time adaptive control in a CORSIM simulation environment,. Transportation Research Record, n° 1727, 2000, 27-31.
- (Heidemann, 1996).** Heidemann D., A queueing theory approach to speed-flow-density relationships. 13th Symp. Int. Conf. Transp. and Traffic Theory, Lyon 1996. , 103-118.
- (Henry, 1983a).** Henry J., Farges J., and Tufal J., The prodyn real time traffic algorithm. Proceedings of the IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, Baden 1983, 305-310.
- (Henry, 1983b).** Henry J.J., The PRODYN Real time Traffic Algorithm. 4th IFAC/IFIP/IFORS International Conference on Control in Transportation Systems, 1983, 307-311.
- (Herman, 1959).** Herman R., Potts R.B., Single Lane Traffic Theory and Experiment. Proc. Symp. on Theory of Traffic Flow. Reserch Labs., General Motors Corp. Elsevier Publishing Co, 1959, 147-157.
- (Hunt, 1982).** Hunt P.B., Robertson R.D., Bretherton R.D. and Royle M.C., The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique. Traffic Engineering and Control, 1982, 190-199.

- (Jbira, 2011).** Jbira M.K. and Ahmed M., Computer Simulation: A Hybrid Model for Traffic Signal Optimization. Journal of Information Processing Systems, Vol. 7, n°1, Mars 2011.
- (Jensen, 1992).** Jensen K., Coloured Petri Nets. Basic concepts, analysis method and practical use, Vol. 1. EATC monographs on Theoretical Computer Science, Springer Verlag, 1992.
- (Julvez, 2005).** Julvez J., and Boel R.. Modeling and controlling traffic behavior with continuous Petri nets. In 16th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), 2005.
- (Khoudour, 1991).** Khoudour L., Lesort J.B., Farges J.L, PRODYN - Three Years of Trials in the ZELT Experimental Zone, Recherche-Transports-Sécurité. English Issue, Special Traffic Management, 1991, 89-98.
- (Kikuchi, 1992).** Kikuchi S., Charkroborty P., Car Following Model Based on Fuzzy Inference System. Transportation Research record, n°1365, 1992. , 82-91.
- (Ko, 2008).** Ko J., Hunter M., Guensler R., Measuring control delay using second by second gps speed data. Journal of Transportation Engineering Vol. 134, No 8, Aout 2008. , 338-346.
- (Kumar, 1990).** Kumar P.R. and Seidman T. I. Dynamic instabilities and stabilization methods in distributed real-time scheduling of manufacturing systems. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 35, 1990, 289-298.
- (Kutz, 2004).** Kutz M., Handbook of transportation engineering. McGraw-Hill, 2004.
- (Langlais, 2008)** Langlais G., De Soras A., Gestion du trafic par auto-organisation optimale, Ecole des Ingénieurs de la Ville de Paris (EIVP), TER 2008.
- (Lannoy, 2001).** Lannoy P., L'intelligence des feux rouges. Sociologie d'une entreprise gestionnaire. Dépôt Institutionnel de l'Académie Louvain, Bruxelles 2001.
- (Lighthill, 1955).** Lighthill M.J., Whitham G.B. On Kinetics waves: A theory of traffic flow on roads. Proceedings of Royal Society, n°229, 1955, 317-345.
- (Lowrie, 1982).** Lowrie P.R., Scats: The sydney co-ordinated adaptive traffic system-principles, methodology, algorithms. Proceedings of the IEE International Conference on Road Traffic Signalling, 1982, 67-70.
- (Motawej, 2012)** Motawej F., Approche par invariance positive et les techniques de l'intelligence artificielle pour la régulation des carrefours signalisés. Ph.D. Automatique, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

- CITATION Mou02 \l 1036 (Mouchiroud, 2002)** Mouchiroud D., Mathématiques : Outils pour la Biologie – DEUG SV1 – UCBL, 2002.
- (Morin, 1989).** Morin J.M., SIMAUT. Notice de présentation. Note SCETAUROUTE, 1989.
- (Murata, 1989).** Murata T., Petri nets: Properties, analysis and applications. Proceedings of IEEE, Vol. 77, Chicago 1989, 541-580.
- (Nagel, 1992).** Nagel K., Schreckenberg M., A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic. J. de physics, Vol. 1, n°2, 1992, 2221-2229.
- (Newell, 1955).** Newell G.F. Mathematical models for freely flowing highway traffic. Operation Research, n°3, 1955, 176-186.
- (Papageorgiou, 2006).** Papageorgiou M., Méthodes de contrôle automatique dans les transports et la gestion du trafic. Génie logiciel n° 75, 2006. , 13-25.
- (Papageorgiou, 1990)** Papageorgiou M., Dynamic Modelling, Assignment and route Guidance in Traffic Networks. Transp. Res. B, Vol. 23, n° 6, pp. 471-495,1990.
- (Payne, 1979)** Payne H. J, FREFLO: A Macroscopic Simulation Model of Freeway Traffic Transportation research, n°23 B, pp. 29-47, 1979.
- (Payne, 1971).** Payne H.J., Models of Freeway Traffic and Control. Math. Models. Publ. Sys. Simul. Council Proc. n°28, 1971. , 51-56.
- (Pierrick, 2010).** Pierrick A. and Kevin V., Amélioration de la circulation routière à un carrefour. TER 2010, Promotion 50, Paris 2010.
- (Ping, 2006).** Ping Yi, Chun Shao, and Li Sheng, Improved Signal Control for Oversaturated Intersection. Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, September 2006, 17-20.
- (Pipes, 1953).** Pipes L,A, An Operational Analysis of Traffic Dynamics. J. Appl. Phys., Vol. 3, n°24, 1953, 274-281.
- (Richards, 1956).** Richards P. I., Shock waves on a highway. Operational Research, vol 4, n°1, 1956.
- (Sammoud, 2013).** Sammoud B., Dridi M., El Moudni A., Benrejeb M., Modeling and Control of an Isolated Intersection via Hybrid Petri Nets,. Journal of Traffic and Logistics Engineering, Vol. 1, n° ,1 Mars, 2013.

- (Sammoud, 2014).** Sammoud B., Mhedhbi I. et Benrejeb M., Modélisation par Réseaux de Petri d'une ligne de traitement de surface réduite. La Revue électronique Sciences et Technologies de l'Automatique, e-STA, 2014-1.
- (Sifakis, 1977).** Sifakis J., Le controle des systèmes asynchrones: concepts, propriétés, analyse statique. Thèse de Docteur en Sciences Mathématiques, Institut Polytechnique de Grenoble, 1977.
- (Sun, 2003).** Sun D. , Benekohal R.F. and Waller S.T. Multiobjective traffic signal timing optimization using non-dominated sorting genetic algorithm. IEEE IV Intelligent Vehicles Symposium Proceeding, Columbus, OH, 2003, 198-203.
- (Tolba, 2004).** Tolba C., Contribution à l'utilisation des réseaux de Petri pour la modélisation et la régulation du trafic urbain et interurbain. Thèse de Doctorat de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2004.
- (Tolba, 2001).** Tolba C., Lefebvre D., Thomas P., El Moudni A., Continuous Petri nets models for the analysis of traffic urban networks. Proc. of the IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conference, Tucson, 2001, 1323-1328.
- (Vasquez, 2010).** Vasquez R.C., Sutarto H.Y., Boel R., Silva M., Hybrid Petri net model of a traffic intersection in a urban network. IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, September 2010, 8-10.
- (Violina, 2006).** Violina I., Contribution à la modélisation et la commande du trafic routier: Approches par bond graph et commande par platitude, Thèse de Doctorat, 2006.
- (Wang, 1993).** Wang H., List G.F., Di Cesare F., Modelling and evaluation of traffic signal control using timed Petri nets. CESA, Vol. 2, Le Touquet, 1993, 180-185.
- (Webster, 1958).** Webster F.V., Traffic signal setting. Road Research Technical Paper, n° 39, Road Research Laboratory, London, 1958.
- (Yagar, 1991).** Yagar S., Corridor control system. Concise Encyclopaedia of Traffic and Transportation System, Editor Papageorgiou M., 1991, 79-83.
- (Yan, 2008).** Yan F., Dridi M. and El Moudni A., A scheduling approach for intelligent vehicle sequencing problem at multi-intersection networks. International Journal of Operation Research, Vol. 1, 2008, 57-68.