

HEC MONTRÉAL
AFFILIÉE À L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

La gestion en temps réel d'un feu de circulation
dans le contexte des systèmes de transport intelligents

par

Aïdée Carrière

Sciences de la gestion

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de maîtrise ès sciences
(M. Sc.)*

Novembre 2005
© Aïdée Carrière, 2005



m.2005
no 132

DÉCLARATION DE L'ÉTUDIANTE, DE L'ÉTUDIANT
ÉTHIQUE EN RECHERCHE AUPRÈS DES ÊTRES HUMAINS

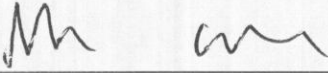
Recherche sans collecte directe d'informations

Cette recherche n'impliquait pas une collecte directe d'informations auprès de personnes (exemples : entrevues, questionnaires, appels téléphoniques, groupes de discussion, tests, observations participantes, communications écrites ou électroniques, etc.).

Cette recherche n'impliquait pas une consultation de documents, de dossiers ou de banques de données existants qui ne font pas partie du domaine public et qui contiennent des informations sur des personnes.

Titre de la recherche : La gestion en temps réel d'un feu de circulation dans le
contexte des Systèmes de transport intelligents

Nom de l'étudiante, Aïdée Carrière
de l'étudiant : _____

Signature :  _____

Date : 2 août 2005

Sommaire

Les feux de circulation ont été créés afin de gérer le déplacement des véhicules à l'intérieur d'un carrefour et ainsi prévenir les accidents. Les premiers modèles de gestion des feux de circulation utilisaient l'information provenant de données historiques afin d'optimiser les plans de feux. À cause de la grande variabilité des conditions de circulation, les résultats trouvés à partir de ces modèles donnaient seulement de bons résultats dans les situations correspondant à la moyenne des conditions de trafic. L'avènement des systèmes de transport intelligents (STI) a permis l'optimisation des feux de circulation en temps réel. Les STI permettent de détecter la présence des véhicules à un carrefour à l'aide de différents types de détecteurs, ce qui a permis l'adaptation des feux de circulation en fonction de la demande. Les modèles de gestion des feux les plus récents font appel aux STI.

Nous étudions ici le problème de l'optimisation en temps réel des feux de circulation à un carrefour en utilisant l'information fournie par un STI. Nous proposons un modèle mathématique dont l'objectif est de minimiser le temps de séjour total des usagers dans le carrefour. Le modèle doit tenir compte de la compatibilité des flux afin d'éviter les conflits entre les véhicules. Il doit aussi empêcher que le temps d'attente total d'un véhicule ne dépasse un certain seuil d'attente maximal. L'approche de résolution utilisée pour ce modèle est la méthode de recherche à voisinage variable.

Afin de tester notre modèle, nous avons conçu un simulateur qui remplit deux fonctions : il permet de simuler l'entrée des véhicules à l'aide d'une loi de Poisson et de modéliser le comportement des véhicules dans le carrefour. Notre modèle a été testé sur plusieurs types de carrefours dans différentes conditions de circulation et les résultats ont démontré que notre approche est très prometteuse. L'analyse de nos résultats nous permet de conclure que dans tous les cas testés, notre plan de feux permet d'avoir de meilleurs résultats comparativement à un modèle statique simple.

Table des matières

Chapitre 1 - Introduction	1
Chapitre 2 – Synthèse des travaux existants	5
2.1 Introduction.....	6
2.2 Terminologie.....	7
2.3 Systèmes de transport intelligents.....	8
2.4 Recension des travaux antérieurs	10
Chapitre 3 – Définition du problème	26
3.1 Gestion d'une intersection dans un contexte de STI et énoncé du problème	26
3.2 Formulation mathématique du problème réduit.....	29
3.3 Illustration de l'approche et liens avec les travaux antérieur ...	30
3.4 Simulation.....	35
Chapitre 4 - Approche de résolution.....	37
4.1 Introduction.....	37
4.2 Les méthodes de recherche à voisinage variable	37
4.3 Obtention du plan de feux	39
4.4 Définition des différents voisinages utilisés par le VND.....	43
4.4.1 Changement de flux dans une phase donnée.....	43
4.4.2 Échange de phases dans le plan de feux	44
4.4.3 Changement de durée de phases.....	44
4.4.4 Élimination d'une phase.....	45

4.5 Stratégie de gestion des changements de voisinage	46
Chapitre 5 – Résultats numériques	49
5.1 Introduction.....	49
5.2 Critère de performance	49
5.3 Simulation des conditions de circulation aux carrefours.....	50
5.3.1 Caractéristiques de trafic	50
5.3.2 Caractéristiques des carrefours	51
5.3.3 Hypothèses de la simulation	53
5.3.4 Caractéristiques des différents tests	54
5.3.5 Caractéristiques de la méthode de PFA.....	55
5.3.6 Spécifications supplémentaires.....	55
5.4 Détermination du plan de feux statique de référence	56
5.5 Expérimentation numérique.....	58
5.5.1 Influence du type de carrefour et des conditions de trafic	58
5.5.2 Impact d'un changement brusque des conditions de trafic....	65
5.5.2.1 Changement sur un seul flux.....	65
5.5.2.2 Changement sur plusieurs approches – « Test Centre Bell »	67
5.5.3 Sensibilité aux variations du paramètre de temps d'attente maximum	70
5.5.4 Analyse de l'impact respectif des différents voisinages du VND	72
Chapitre 6 - Conclusion.....	74
Bibliographie.....	76

Liste des figures

Figure 1.1 : Une artère dans l'espace temps.....	11
Figure 3.1 : Carrefour à 10 flux.....	31
Figure 4.1 : Carrefour à 10 flux.....	40
Figure 5.1 : Carrefours utilisés pour les simulations.....	52
Figure 5.2 : 15 minutes de saturation de catégorie 1	66
Figure 5.3 : 15 minutes de saturation de catégorie 0	66
Figure 5.4 : Flux utilisant le plan de feux adaptatif et le plan de feux statique pour le « Test du Centre Bell ».....	67

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Tableau synthèse des différents systèmes de gestion des feux de circulation	25
Tableau 3.1 : Exemple d'un plan de feux statique.....	32
Tableau 3.2 : Exemple d'un plan de feu adaptatif	33
Tableau 4.1 : Tableau de compatibilité pour un carrefour comprenant 10 flux	41
Tableau 4.2 : Plan de feux pour un carrefour à 10 flux.....	43
Tableau 4.3 : Échange de phases dans un plan de feux.....	44
Tableau 4.4 : Changement de durée de phases	45
Tableau 4.5 : Retrait de la phase 3	46
Tableau 5.1 : Catégorie des différents lambdas utilisés	51
Tableau 5.2 : Description détaillée des tests.....	54
Tableau 5.3 : 5 plans de feux statique.....	57
Tableau 5.4 : Résultats après une simulation d'une heure.....	58
Tableau 5.5 : Résultats obtenus pour les 3 carrefours	59
Tableau 5.6 : Détail du test E	60
Tableau 5.7 : Tableau comparatif du PFA et du PFS avec la fonction objectif ajustée	62
Tableau 5.8 : Regroupement des tests comparables	63
Tableau 5.9 : Résultats pour le « test du Centre Bell »	70
Tableau 5.10 : Performance du « test du Centre Bell ».....	70

Tableau 5.11 : Moyenne des résultats des différentes instances des tests en modifiant le temps maximal de la contrainte ou en éliminant la contrainte	71
Tableau 5.12 : Statistique des différents voisinages utilisés	73

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Patrick Soriano, mon directeur de recherche, ainsi que Monsieur Michel Gendreau, de leur soutien indéfectible et de leur encouragement tout au long de ce processus.

Merci également à Monsieur François Guertin et à Monsieur Serge Bisailon qui m'ont permis de m'améliorer en programmation. Gardez votre joie de vivre!

J'aimerais aussi remercier les personnes concernées pour leur patience dans l'accomplissement de ce mémoire.

Ce mémoire est dédié à mon père, ma source d'inspiration.

Merci maman chérie, toi qui as su m'encourager et qui me guide dans mon épanouissement. Quant à toi grand frère, tu es toujours là, tout simplement. Merci! Et toi Bianca, ma bonne amie, merci de ta grande générosité et de ton amitié.

Enfin, à Pascäl, mon amour, merci de ta complicité. Merci également de ce leitmotiv : « La vie me donne ce que j'attends d'elle ». Je t'aime!

Chapitre 1 - Introduction

Les feux de circulation constituent le moyen le plus répandu de gérer le flux des automobiles aux carrefours routiers (tant en milieu urbain que rural). Leur rôle est de rendre fluide le déplacement des automobiles et de rendre ceux-ci le plus sécuritaire possible en prévenant les accidents entre véhicules et impliquant des piétons. Plusieurs méthodes ont été utilisées afin de gérer efficacement les feux de circulation. Au tout début, le changement des feux était réalisé manuellement [17], puis des systèmes automatisés ont été introduits et avec le temps, ceux-ci sont devenus de plus en plus sophistiqués. Certains d'entre eux sont d'ailleurs basés sur des modèles mathématiques plus ou moins complexes et sont commercialisés depuis plusieurs années. De tels modèles sont utilisés dans de nombreuses villes à travers le monde.

Depuis quelque temps, la gestion de la circulation en général et celle des feux de circulation en particulier ont grandement évolué suite à l'avènement des systèmes de transport intelligents (STI). Ces systèmes permettent, à l'aide de différents types de détecteurs, de déceler la présence de véhicules à un carrefour et de recueillir en temps réel une foule d'informations sur la circulation routière : la vitesse des véhicules, la distance entre deux véhicules, etc. Les modèles de gestion des feux de circulation les plus récents font appel aux STI afin d'optimiser le contrôle des feux de circulation en temps réel, c'est-à-dire que les feux de circulation à un carrefour s'adaptent à la demande au fur et à mesure que celle-ci varie dans le temps.

Les systèmes automatisés traditionnels [17] fonctionnent de façon à ce que chaque flux dans un carrefour se voit accorder un temps de vert, de jaune et de rouge prédéterminé. Le temps alloué pour passer du début du feu vert au jaune, puis au rouge et ensuite revenir au début du feu vert est appelé le temps de cycle. Celui-ci est une donnée associée à un carrefour et sera donc la même pour tous les flux transitant à un même carrefour. Plusieurs flux dans un carrefour peuvent se voir accorder le feu vert en même temps si les véhicules qui les composent peuvent circuler sans risque d'accident (on dira alors que ces flux sont compatibles), c'est ce qu'on appelle une phase. Par exemple, une phase pourrait avoir deux flux, un premier flux nord-sud et un second flux sud-nord. Il existe alors, pour un carrefour, la possibilité d'avoir au moins deux phases ou même davantage. L'enchaînement de plusieurs phases compose ce qu'on appelle le plan de feux.

Les systèmes non adaptatifs utilisent l'information provenant de données historiques afin de déterminer les paramètres de gestion de flux de l'intersection [17]. Ils sont donc incapables de s'ajuster automatiquement aux changements observés dans les conditions de circulation alors que dans le contexte des STI, les feux de circulation peuvent être contrôlés en temps réel. Ils permettent donc l'ajustement des plans de feux en fonction des conditions de trafic observées en allouant le feu vert aux différents flux pour un intervalle de temps adapté à leurs besoins. Ils ont ainsi remis en question l'utilisation des cycles et la définition traditionnelle des phases. Cette remise en question a permis une plus grande flexibilité dans le contrôle des feux.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous proposons d'étudier le contrôle des feux de circulation dans un contexte où les cycles sont éliminés et où la notion de phase est modifiée. L'objectif principal est de

trouver une méthode qui permette de minimiser le temps de séjour total des usagers à un carrefour en temps réel en faisant appel aux STI afin de détecter la présence des véhicules au carrefour. Nous avons décidé de nous limiter à l'optimisation d'un seul carrefour, problème qui est en soit déjà complexe. L'optimisation en temps réel d'un réseau composé de plusieurs carrefours est encore plus complexe puisque tous les carrefours à l'intérieur de celui-ci sont interdépendants. Beaucoup d'améliorations sont encore possibles sur l'optimisation d'un seul carrefour et nous espérons que nos travaux constitueront une étape vers le développement de systèmes permettant de gérer les feux sur des réseaux étendus.

Les différents modèles de gestion de feux de circulation commercialisés qui seront présentés sont en fait des systèmes qui permettent, à l'aide de divers modules, de contrôler un ou plusieurs feux de circulation. Ces modules peuvent entre autres optimiser la gestion des feux, simuler le comportement des véhicules, prédire leur arrivée au carrefour, optimiser les feux verts entre les différents carrefours, etc. Ces modules peuvent s'avérer très complexes. Nous ne discuterons que du fonctionnement global de ces modèles puisque l'information publiée à leur sujet est très sommaire. Le but de notre mémoire est en fait de créer un module d'optimisation qui pourrait être intégré dans ces systèmes dans le but d'améliorer leur performance.

Puisque l'information nécessaire afin de reproduire les modèles commercialisés et de les tester n'est généralement pas disponible, nous devons évaluer nos méthodes en comparant les résultats qu'elles obtiennent à ceux obtenus par un plan de feux statique. N'ayant pas accès à des données réelles, nous avons également dû développer un module de simulation informatique afin de « reproduire » les conditions de circulation pouvant être observées dans différents types de

carrefours et ainsi pouvoir évaluer la performance en temps réel des méthodes de contrôle proposées dans ce mémoire.

Ce mémoire comporte six chapitres. Le prochain chapitre décrit plus en détail le sujet du mémoire. Le deuxième chapitre porte sur la synthèse des travaux existants. Il inclut également une section qui traite de la terminologie nécessaire afin de mieux comprendre la problématique du contrôle des feux de circulation. Le troisième chapitre énonce les différentes hypothèses du problème et le problème à résoudre. On y présente également une formulation mathématique du problème. Le chapitre quatre présente l'approche de résolution proposée ainsi que les diverses variantes testées. Les résultats obtenus suite à l'expérimentation numérique sont présentés et analysés dans le chapitre cinq qui est suivi de la conclusion.

Chapitre 2 – Synthèse des travaux existants

Dans ce chapitre, nous passerons en revue plusieurs définitions de termes nécessaires à la compréhension du contenu de ce mémoire ainsi que les méthodes de gestion qui ont été mises en place depuis l'apparition des premiers feux de circulation. Ensuite viendront les différents modèles et approches mathématiques qui ont été proposés afin de résoudre les problèmes de gestion de la circulation. Nous finirons en examinant plus en détail les différents systèmes, plus particulièrement leur module d'optimisation, qui ont été commercialisés et qui sont maintenant utilisés un peu partout dans le monde. Les formulations des modèles mathématiques commercialisés n'étant pas disponibles au public, nous ne ferons qu'une description conceptuelle de leur fonctionnement en nous basant sur les informations publiées à leur sujet.

2.1 Introduction

Avant 1923, la gestion des feux de circulation était accomplie manuellement [17]. Ainsi, tout changement au niveau des feux était basé sur l'instinct des contrôleurs. Peu à peu, des systèmes plus sophistiqués furent utilisés afin d'automatiser ces tâches en ayant comme objectif de minimiser le temps d'attente des usagers, de maximiser le nombre de véhicules pouvant circuler sur le feu vert, etc. Le premier concept utilisé de façon courante est le concept de feux à contrôle automatique fixe qui comprend des phases prédéterminées avec des temps de cycles, des temps de vert et de décalages fixes. Ces termes seront définis plus précisément dans la section suivante. Pour un carrefour donné, tous ces paramètres qui permettent de gérer la circulation d'un carrefour sont calculés sur la base de données historiques. Ils ne peuvent évidemment pas tenir compte de la situation réelle au carrefour à un instant donné. Cette approche est encore très utilisée de nos jours et semble encore la plus répandue à travers le monde, même dans les pays industrialisés. Les problèmes de gestion des feux de circulation comportent beaucoup de facteurs qui rendent le problème très complexe, ceci est la raison principale qui motive le recours à des heuristiques.

Tout au long de ce chapitre, plusieurs modèles seront décrits. L'information sur ces différents modèles provient de Braban et Boillot [6] qui ont fait une synthèse sur les différents systèmes de gestion des feux en temps réel existant en milieu urbain. Plusieurs autres notions ont été tirées du cours de « Dynamique de la circulation CIV6706 » donné à l'École Polytechnique de Montréal par le professeur K. Baass [2].

2.2 Terminologie

Plusieurs termes doivent être définis afin de bien décrire la situation et la problématique. Cette section explique entre autres les termes communs à chaque modèle de gestion des feux de circulation.

Un **carrefour** est défini comme étant une intersection de plusieurs rues où différents flux de véhicules doivent circuler de manière ordonnée. Un ensemble de carrefours constitue un **réseau**. Chaque carrefour possède un **cycle** qui correspond au temps alloué pour passer du début du feu vert au feu jaune, puis au feu rouge et ensuite revenir au début du feu vert. Le temps accordé au feu vert et au feu rouge peut varier selon la demande de chaque carrefour. Par contre, le temps accordé au feu jaune est une donnée fixe, qui est habituellement entre 2,5 et 3 secondes. La prise de décision quant au changement ou non de l'état des feux de circulation au rouge ou au vert par rapport à leur situation présente est-ce qu'on appelle la **commutation** du feu de circulation. Tel que mentionné au chapitre précédent, une **phase** correspond à un ensemble de flux qui ont droit au feu vert en même temps. C'est-à-dire, qu'une phase pourrait avoir deux flux, un premier flux nord-sud et un second flux sud-nord. Un changement de phase survient lorsqu'au moins un des flux change de statut, c'est-à-dire qu'il passe du vert au rouge ou du rouge au vert. Un carrefour peut avoir deux phases ou davantage. La séquence finie des différentes phases effectuant la commutation des feux d'un carrefour compose le **plan de feux** pour un temps de cycle prédéterminé.

Un groupe de véhicules qui traverse un carrefour en même temps est un **peloton** de véhicules. Plusieurs modèles adoptent une stratégie visant à maximiser la taille des pelotons de véhicules et à minimiser leur nombre d'arrêts à un feu rouge sur une artère donnée en ajustant les

temps de vert de plusieurs carrefours sur cette artère. Cette stratégie est connue sous le nom de **synchronisation**. Elle peut aussi être définie comme étant l'**optimisation du décalage**.

Une intersection est dite **saturée** lorsqu'un véhicule doit attendre plus d'une phase pour traverser le carrefour comme on pourra l'observer un peu plus loin. Plusieurs modèles présents dans la littérature ajustent la définition du degré de saturation afin de mieux définir le problème auquel ils s'appliquent. Nous allons donc préciser cette notion au besoin à travers ce chapitre. La notion de **degré de saturation** est reliée au nombre maximal de véhicules que peut contenir un tronçon sans que ceux-ci soient forcés de s'arrêter à un feu rouge. Une artère principale est une artère où l'on retrouve une plus grande concentration de circulation et un degré de saturation plus élevé alors qu'une artère secondaire correspond aux approches moins importantes en terme de quantité de circulation et a un degré de saturation moins élevé. En général, le degré de saturation sera plus élevé pour une artère principale que pour une artère secondaire. La demande des différents flux est proportionnelle au degré de saturation. La demande et le degré de saturation sont plus élevés aux heures de pointe qu'aux périodes hors pointe.

2.3 Systèmes de transport intelligents

La recherche au niveau de la gestion des feux de circulation a connu une très grande popularité depuis les années 1960 jusqu'aux années 1980. Après cette période, ce domaine de recherche a été un peu délaissé. L'arrivée des systèmes de transport intelligents (STI) a relancé l'étude de la gestion des feux de circulation en permettant l'utilisation de l'information sur l'évolution de l'état de la circulation aux carrefours. Ceci a amené la possibilité d'optimiser les décisions de commutation à un carrefour donné en fonction de ces informations. Dans les systèmes

décentralisés, certaines informations peuvent éventuellement être échangées d'un carrefour à l'autre mais généralement la majorité d'entre eux ne tiennent compte que de l'information provenant du carrefour local pour leur optimisation. Les STI centralisés relient les différents carrefours du réseau entre eux afin de rendre possible l'échange d'information. Le partage de ces informations permet alors d'optimiser les décalages des décisions de commutation entre les carrefours en fonction du changement des conditions de trafic, ce qui permet une meilleure qualité de la gestion de la circulation mais au prix d'une complexité beaucoup plus élevée que pour les systèmes décentralisés. Comme on peut le voir, les possibilités qu'amène l'utilisation des STI sont nombreuses et débouchent sur de nouveaux problèmes d'optimisation.

Les premiers détecteurs de conditions de trafic en temps réel utilisés pour gérer les feux de circulation étaient sonores et ont été introduits dès 1927 [17]. Afin d'être décelés et d'avoir du temps de vert, les véhicules devaient klaxonner en arrivant au carrefour. Cette méthode n'était utilisée que lorsque la circulation des flux était faible. Depuis cette époque, les détecteurs ont évolué et on retrouve maintenant aux carrefours des réseaux équipés de STI des boucles à détection magnétique, à détection photoélectrique, à détection infrarouge, ainsi que les détecteurs vidéo. Ces appareils permettent de recueillir l'information sur le déplacement des véhicules et ainsi prévoir leur déplacement futur. On peut donc envisager d'utiliser ces informations afin d'améliorer la gestion des carrefours.

Les systèmes de feux adaptatifs et semi-adaptatifs sont tous deux des systèmes qui utilisent des données en temps réel. Ces systèmes peuvent détecter la présence de véhicules d'un flux donné dans un carrefour et leur donner priorité au vert. Un système adaptatif détecte

les véhicules sur tous les flux du carrefour et peut donc s'ajuster à la demande sur l'ensemble du carrefour. Le système semi-adaptatif n'a des détecteurs que sur les artères principales. Il ne s'ajuste donc qu'à la demande de ces derniers. Les artères secondaires ayant une demande moins élevée ne sont généralement pas équipées de détecteurs. Leur temps de vert sera donc ajusté en fonction des conditions observées dans les artères principales et non des leurs, ce qui peut réduire la fluidité de la circulation pour ces approches.

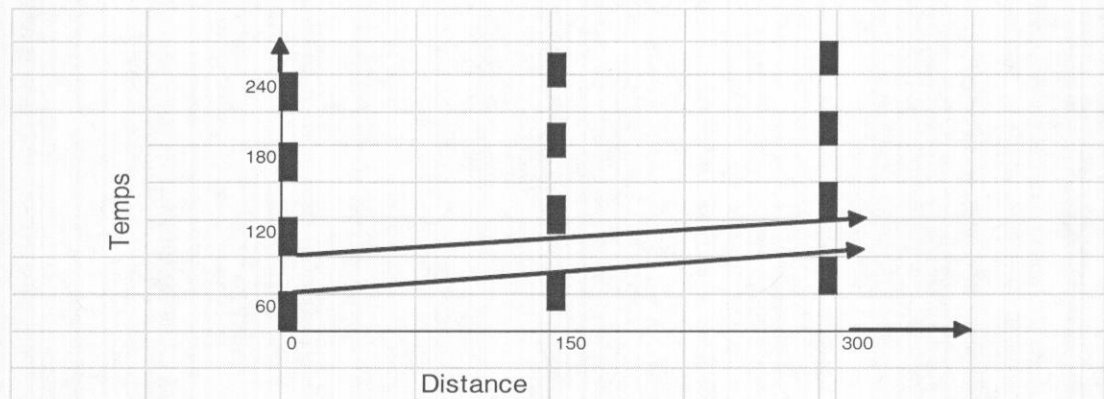
2.4 Recension des travaux antérieurs

Morgan et Little [19] ont proposé un modèle permettant de maximiser le nombre de véhicules passant sur une artère sans s'arrêter au feu rouge, donc d'optimiser les décalages des différents feux localisés le long d'une artère. Depuis, ce modèle est aussi connu sous le terme *d'optimisation de la bande verte*. L'objectif du modèle est d'augmenter la taille du peloton de véhicules pouvant passer sur l'artère (et ce dans les deux sens). Pour chaque carrefour du réseau, on dispose du temps de cycle ainsi que de la proportion de temps de vert pour les flux de l'artère. Ce sont des données du problème.

La figure 1.1 représente une artère dans l'espace temps. Nous avons alors trois feux de circulation, le premier situé à une distance de 0 mètre, le deuxième à 150 mètres et le dernier à 300 mètres. Les axes de notre graphique représentent les changements du feu vert au feu rouge pour les trois carrefours. Les carrés noirs représentent le feu rouge pour un feu de circulation et les espaces blancs situés au-dessus représentent le feu vert. La bande verte est illustrée par la largeur des lignes et c'est ce que Morgan et Little essayent d'optimiser. Ceci dit, le premier véhicule partira du premier carrefour à 60 secondes et puis celui-ci pourra se rendre jusqu'au troisième carrefour sans arrêt. Ceci

est vrai pour tous les véhicules qui partent du premier carrefour pendant son premier temps de vert.

Figure 1.1 – Une artère dans l'espace temps



Pour résoudre le problème, Morgan et Little procèdent par l'énumération de toutes les possibilités afin de trouver la meilleure solution, c'est-à-dire de trouver quelle combinaison de feu vert permet d'avoir la bande verte la plus importante. La méthode consiste à choisir la première intersection et rendre à tour de rôle tous les autres feux sur cette artère vert et ensuite rouge. Ensuite, à partir de l'intersection ainsi identifiée, il détermine quelle est la bande verte la plus grande. On dit alors que ce feu est critique puisque l'état de tous les autres flux dépend de lui. Il utilise ensuite la même méthode sur la deuxième intersection et continue ainsi de suite pour tous les feux. Dans notre exemple, on pourrait alors allouer du temps de vert au temps zéro et puis réajuster notre graphique pour nous donner une différente largeur au niveau de la bande verte. La solution qui permet de trouver la plus grande bande verte est retenue.

Morgan et Little ont remarqué qu'ils devaient concentrer leurs efforts sur la maximisation du passage des véhicules dans un sens de circulation

et ceci, aux dépens de l'autre puisqu'il était très difficile d'optimiser les deux sens à la fois. Le modèle de Morgan et Little a ensuite été repris par plusieurs chercheurs afin d'en améliorer certains aspects ou de tenir compte de nouvelles notions : les piétons, les véhicules de transport en commun, le changement de vitesse des véhicules entre les carrefours, le virage à gauche et à droite, etc.

Brooks [9] a repris le même problème et les mêmes hypothèses que Morgan et Little. Il détermine la bande verte maximale en utilisant le plus petit temps de vert de tous les carrefours (i.e. feux). Ceci est le concept de borne supérieure. Le modèle sélectionne donc le feu ayant le plus petit temps de vert et le rend critique. À partir de celui-ci, on ajuste les autres feux en leur donnant soit le vert ou le rouge afin de maximiser la bande verte. La méthode de Brooks est plus rapide puisqu'elle ne construit qu'une seule solution mais en utilisant dès le départ le carrefour ayant le plus petit temps de vert. Le modèle de Morgan et Little fait une énumération de toutes les solutions possibles alors que le modèle de Brooks permet de trouver la solution la plus intéressante dès la première itération.

Certains modèles de gestion des feux de circulation ont été commercialisés. Ceux-ci utilisent soit des capteurs qui déterminent la position des véhicules en temps réel, soit une méthode qui permet de simuler le déplacement des véhicules ou bien les deux.

Le premier modèle commercialisé a été TRANSYT – Traffic Network Study Tool [22] - est un modèle à temps fixe qui fonctionne avec des données historiques et suppose que les débits sont constants. Il permet l'optimisation des décalages et de la répartition des durées de vert. Le cycle est, dans ce cas, une donnée qui est commune à chaque carrefour du réseau. Le module d'optimisation, cherche à minimiser un

indice de performance. Cet indice est une fonction de la somme de tous les véhicules à l'arrêt sur l'ensemble des intersections considérées ainsi que la somme du nombre moyen de véhicules dans les files d'attente pour chaque flux à chaque intersection. Le modèle utilise un histogramme de flux qui permet d'évaluer les déplacements des véhicules selon une fonction de dispersion. La méthode consiste à déterminer le décalage optimal d'un carrefour en considérant que les décalages des autres carrefours sont fixes. Une fois un carrefour optimisé, on passe au prochain carrefour en considérant encore une fois que les décalages des autres carrefours est fixe pour cette « itération » et ainsi de suite. La même méthode est utilisée pour la durée de vert. La solution optimale est trouvée en utilisant une méthode de descente. Cette méthode consiste à passer d'une solution à une autre en vérifiant si la nouvelle solution est meilleure que la solution précédente. Si oui, on l'adopte, sinon on passe à la prochaine itération.

Plusieurs solutions incluant un plan de feux et des décalages sont construites pour différentes périodes de la journée et les degrés de saturation leur correspondant. Ceux-ci sont emmagasinés dans des bibliothèques. Une solution optimale est ensuite sélectionnée dans les bibliothèques soit : par commutation manuelle, par la programmation horaire ou en analysant le degré de saturation de l'état réel des carrefours du réseau et en implantant le plan de feux et le décalage « optimal » obtenu pour les conditions de circulation les plus proches de celles observées.

SCOOT – Split Cycle and Offset Optimization Technique - a été développé entre 1972 et 1980 [13, 23, 24]. C'est un système adaptatif qui permet l'optimisation en temps réel de la répartition des temps de vert, des temps de cycle ainsi que des décalages de feux de circulation à l'intérieur d'un réseau. Les capteurs utilisés dans ce cas, sont des

boucles magnétiques situées en amont du carrefour. L'emplacement des capteurs est un aspect primordial au bon fonctionnement du réseau mais qui dépasse largement le cadre de ce mémoire. Nous ne traiterons donc pas ici ni ne ferons de recension de la littérature scientifique traitant de cette question. Le débit et la durée d'occupation des véhicules aux carrefours proviennent des capteurs et cette information est mise à jour quatre fois par seconde. La durée d'occupation des véhicules est tout simplement une donnée qui permet d'estimer le nombre moyen de véhicules en arrêt et permet ainsi de prédire, avec l'état du plan de feux ainsi que de la vitesse à laquelle la file d'attente se décharge, si la file d'attente est sous-estimée. L'information provenant des capteurs est utilisée afin de générer un histogramme de flux [18] qui est en fait une prédiction du comportement des véhicules afin de gérer les feux en tenant compte des véhicules déjà dans le carrefour. L'histogramme permet d'estimer les files d'attente, les arrêts et les retards des véhicules.

SCOOT se base sur une division du réseau en plusieurs zones disjointes. Le nombre total de carrefours pouvant être traité est cependant limité. Le cycle des carrefours à l'intérieur de chaque zone est identique. SCOOT prédit les retards et les arrêts des véhicules en utilisant l'information des capteurs. La fonction objectif du module d'optimisation est un indice de performance que l'on définit comme étant la somme pondérée des deux facteurs suivants : le nombre de véhicules arrêtés sur tous les flux du carrefour et la longueur de la file d'attente sur tous les flux. Deux constantes sont utilisées afin de pondérer la somme des véhicules arrêtés et la proportion du temps d'un cycle où les détecteurs sont occupés. Les détecteurs sont dits « occupés » lorsqu'ils détectent la présence de véhicules. Le calibrage de ces constantes n'étant pas discuté dans les articles, il ne sera donc pas traité dans ce mémoire.

Le module d'optimisation de SCOOT permet l'ajustement du plan de feux contrairement à une optimisation comme le dit son nom en misant sur de petites variations de la durée du cycle, de la durée du vert et des décalages. Le modèle prend en considération les files d'attente ainsi que le degré de saturation de chacune des artères dans le but de le rendre inférieur à 90 %. Dans ce modèle, le degré de saturation est tout simplement le rapport entre le débit moyen et le débit maximum des véhicules pouvant traverser l'artère. Plus celui-ci se rapproche de 100 %, plus grand devient le risque de congestion. SCOOT prédit les longueurs des files d'attente [14] sur les artères avec l'information des capteurs et en prenant comme hypothèse que la vitesse des véhicules est une constante préalablement fixée.

Juste avant d'effectuer un changement, une vérification est faite pour s'assurer que la bonne décision est prise; on vérifie alors quelques secondes avant d'effectuer un changement, s'il est préférable de faire changer l'état du feu à l'instant prévu ou quelques secondes avant ou après. La décision est prise en considérant ce que le changement aura comme effet sur l'indice de performance, donc sur le degré de saturation de l'artère. Chaque carrefour appartenant à une zone possède le même cycle alors que la proportion qu'occupe le temps de vert à l'intérieur du cycle lui est propre. Les contraintes du modèle sont les suivantes : chaque temps de cycle et chaque temps de feu vert doivent être compris entre un minimum et un maximum prédéterminés.

D'autres éléments ont aussi été étudiés par la suite [4] : la détection d'incidents, la priorité donnée aux véhicules de transport en commun, l'échange d'information entre les carrefours voisins et l'accumulation de véhicules sur plusieurs artères. Cette accumulation est tout simplement l'augmentation des files d'attente aux carrefours en amont par une

réduction de leurs temps de vert afin de réduire l'engorgement d'un carrefour donné.

SCOOT permet d'optimiser le changement de l'état des feux de plusieurs carrefours à l'intérieur d'une zone sur un horizon à court terme. Le cycle pour chacun de ses carrefours est identique ce qui permet une moins grande flexibilité. Les petites variations au niveau du temps de vert, des cycles et des phases diminuent l'adaptivité du modèle. Ce modèle a permis des améliorations intéressantes lors de tests mais il ne semble pas être capable de gérer des problèmes de grande taille et les articles consultés ne mentionnent pas l'adaptivité du modèle lors de sursaturation des conditions de trafic. Il serait alors intéressant de remplacer le module d'optimisation de SCOOT par le nôtre afin d'évaluer l'augmentation de performance qui en résulterait.

SCATS – Sydney Coordinated Adaptive Traffic System [16], un autre modèle commercialisé, a été développé dans les années 1980 en Australie. Il fait lui aussi varier la répartition de vert, les décalages et les durées de cycle afin de minimiser les retards et les arrêts. Ce modèle comporte trois modes de fonctionnement différents : le mode dynamique qui utilise les données réelles pour optimiser chaque sous-système, le mode dynamique isolé où les données réelles sont utilisées mais où chaque carrefour fait sa propre optimisation et le mode en temps différé où les plans sont prédéterminés selon la journée et le moment de la journée.

Les capteurs utilisés sont des boucles magnétiques implantées à chaque carrefour qui servent à déterminer le débit à un carrefour donné ainsi que le temps d'inoccupation des carrefours pendant la durée de vert. La vitesse instantanée ainsi que les écarts entre les véhicules sont aussi enregistrés. On se sert de toutes ces données pour calculer le

degré de saturation qui représente ici le rapport entre le temps de feu vert nécessaire afin de vider le flux et le temps de vert total accordé. L'objectif du module d'optimisation est de minimiser la somme des retards et des arrêts pour chaque carrefour. Pour le cas dynamique, le réseau est optimisé dans son ensemble contrairement à chaque carrefour individuellement. Le réseau est divisé en sous-systèmes qui comportent eux-mêmes plusieurs carrefours voisins qui fonctionnent tous sur le même cycle. On utilise le carrefour ayant le plus grand degré de saturation pour évaluer quel plan de répartition de feu sera adopté. La durée du cycle est déterminée en se basant sur le temps de parcours des véhicules, sur le débit du carrefour le plus achalandé et sur son degré de saturation. La durée de cycle est une donnée qui peut changer constamment mais qui ne peut varier de plus de 6 secondes à la fois. Elle doit respecter plusieurs contraintes, notamment se situer entre un minimum et un maximum prédéterminé et avoir une valeur moyenne de cycle qui assure une bonne coordination du carrefour. Ce modèle permet aussi, s'il y a une quantité importante de véhicules sur le carrefour, d'augmenter le cycle maximal du carrefour par une valeur de cycle prédéterminé.

SCATS fonctionne avec des bibliothèques : durée de vert, décalages internes, décalages externes. Ces bibliothèques contiennent des données déjà calculées qui ont été créées pour différentes conditions de circulation. SCATS permet de changer le critère d'optimisation pour chaque mode de circulation différent. Par exemple, pour la circulation de nuit, SCATS cherche à minimiser les arrêts, alors qu'en période de pointe il cherche à maximiser les débits. Le fonctionnement de SCATS se fait de la façon suivante : les données des détecteurs sont utilisées pour calculer le degré de saturation pour chacun des différents plans provenant des bibliothèques. Le plan permettant le degré de saturation le plus petit est choisi et est utilisé aux feux de circulation. Cette

méthode est utilisée pour la répartition de vert, pour la durée des cycles ainsi que pour les décalages.

SCATS a ensuite été adapté afin de tenir compte de la priorité accordée aux autobus et aux tramways. Les améliorations futures prévues [20, 21] devraient tenir compte de la prédiction de l'évolution de la circulation pour ensuite déterminer la prédiction de la demande sur un ou plusieurs cycles.

SCOOT et SCATS [16] sont des systèmes qui permettent des modifications au niveau de certains paramètres afin de minimiser un objectif composé des retards et du nombre d'arrêts. Leur faiblesse vient du fait qu'ils fonctionnent de façon à faire des modifications par rapport aux données qui sont mesurées et n'essayent pas de prédire l'entrée des nouveaux véhicules dans le carrefour. SCOOT prédit cependant le comportement des véhicules qui se retrouvent déjà à l'intérieur du carrefour à l'aide de son histogramme de flux. Celui-ci est mis à jour régulièrement avec les nouvelles données provenant des capteurs. SCATS consiste plutôt à calculer le degré de saturation avec l'information provenant des capteurs et ainsi ajuster les conditions de circulation à l'aide des différents plans contenus dans les bibliothèques. Ils réagissent donc à l'état présent du système, c'est-à-dire la situation présente aux carrefours mais n'anticipent pas l'évolution de cette situation.

D'autres modèles ont été conçus afin d'améliorer les conditions de circulation pour d'autres types de véhicules comme par exemple les véhicules de transport en commun, sans pour autant désavantager la circulation des véhicules privés. Ces modèles, bien que touchant clairement au domaine de la gestion de la circulation, ne seront pas détaillés ici car les problèmes qu'ils visent à résoudre sont trop éloignés

de celui traité dans ce mémoire. Par la suite, les modèles sont ensuite devenus de plus en plus sophistiqués du point de vue de la détection de véhicules, de la prédiction et simulation des véhicules ainsi que de la gestion des feux de circulation. Les modèles plus récents font appel à la programmation dynamique.

PRODYN – Programmation dynamique – a été conçu au début des années 1980 [8, 12]. C'est un système qui contient un module d'optimisation. Celui-ci permet de déterminer, au fur et à mesure, et pour chaque carrefour donné, s'il est avantageux de faire la commutation des feux. Il détermine une séquence « optimale » des feux en abandonnant la notion de cycle ce qui veut dire que le temps de vert accordé à chaque flux à l'intérieur d'une phase n'est pas fixe. Ce module utilise la programmation dynamique afin de résoudre le problème. Il fait appel à trois capteurs de boucles magnétiques : l'un implanté au début de l'artère, l'autre à une cinquantaine de mètres de l'intersection et le troisième sur la ligne de feu. Les données fournies par les capteurs permettent : d'estimer la longueur de la file d'attente, de prédire les arrivées futures, de connaître le débit et finalement, de mesurer la présence d'un véhicule. Toutes ces données servent à déterminer l'état du feu.

Dans son module d'optimisation, PRODYN cherche à minimiser le retard total approximé par la longueur des queues calculées sur chaque flux pour tous les carrefours. L'optimisation se fait sur un horizon de 75 secondes discrétisé en 15 unités de temps de 5 secondes chacune. À chaque unité de temps, dans un contexte d'horizon glissant, une décision doit être prise : doit-on faire un changement sur l'état du feu ou non? Cette décision est prise en tenant compte des décisions des unités de temps précédentes.

PRODYN détermine quel flux aura le feu vert à partir des informations suivantes : l'état actuel du système, l'évolution future prévue du système et le critère d'optimalité. Le module d'optimisation a comme contrainte un temps de vert minimum et maximum et une longueur maximale des files d'attente. PRODYN a donc été développé pour optimiser un carrefour isolé mais son modèle a ensuite été amélioré afin de modéliser un réseau en échangeant de l'information entre carrefours voisins de façon soit centralisée, soit décentralisée [1]. Le modèle peut aussi être adapté pour tenir compte des piétons.

OPAC – Real Time Optimization Policies for Adaptive Control [10] a été développé en 1982. Tout comme PRODYN, son module d'optimisation détermine, à chaque instant, si une commutation doit être faite et ceci sur un horizon déterminé. Par contre, OPAC ne semble être appliqué qu'au niveau local d'un carrefour isolé. Ce système nécessite des capteurs, des boucles magnétiques placées au début de chaque artère. Le module d'optimisation cherche à minimiser l'indice de performance qui correspond à la somme du temps total d'attente des véhicules. Il prend premièrement un horizon de longueur fini que l'on découpe en un nombre fini de *pas* de temps de durée de 5 secondes. La prédiction de l'arrivée des véhicules est connue sur un horizon de 50 à 100 secondes. La fonction objectif tient compte du temps total d'attente pour les 3 prochains pas.

Il existe trois différentes versions du module d'optimisation d'OPAC. La version 1 : la programmation dynamique qui détermine toutes les commutations possibles sur un horizon. Ceci implique qu'à chaque 5 secondes, on détermine s'il y a une commutation ou non pour un horizon donné. Ces décisions peuvent être représentées par un arbre de décision. La version 2 : la Pseudo-Programmation Dynamique est

une application en temps réel qui découle de la version 1. La distinction par rapport à la version précédente est qu'il faut au moins faire une commutation sur l'horizon et au plus en faire trois. Ceci devient alors une recherche séquentielle où toutes les possibilités doivent être considérées. Les deux premières versions supposent que les arrivées sont connues sur tout l'horizon. La première version a un coût très élevé en terme de temps de calcul, c'est pour cette raison qu'elle ne peut être appliquée dans une situation en temps réel. La version 2 reste lourde en terme de temps de calcul mais elle est moins coûteuse que la version 1 ce qui lui permet d'être utilisée en temps réel. La version 3 : l'optimisation par horizon glissant est plus particulière car elle procède par optimisations successives sur une partie de l'horizon de planification qu'on appellera la fenêtre d'optimisation qu'on met à jour au fur et à mesure jusqu'à avoir couvert tout l'horizon. Les bornes de la fenêtre étant choisies, on extrait l'information au sujet de la situation correspondant à cette fenêtre à partir des données fournies par les capteurs. Avec cette information et le modèle de prédiction, on fait l'optimisation des commutations de vert du carrefour. Puis on décale la fenêtre d'optimisation d'un certain *pas* de temps prédéterminé et on recommence le processus jusqu'à avoir optimisé la commutation sur tout l'horizon de planification.

MOVA – Microprocessor Optimized Vehicle Actuation [25] a été développé durant les années 1980. C'est un système qui optimise la gestion des feux mais au niveau des carrefours isolés. Ce système est muni de deux capteurs par voie, l'un situé à 40 mètres des lignes de feu et l'autre à 100 mètres qui permet de détecter les conditions de circulation saturées. Le module d'optimisation de MOVA a comme objectif de minimiser les retards et les arrêts. Il permet de mesurer l'intervalle entre deux véhicules pour déterminer s'il est nécessaire d'apporter une correction au statut du feu en se basant sur le degré de

saturation. MOVA reconnaît d'autre part lorsqu'une file d'attente ne s'écoule pas. À ce moment, un changement automatique se fait pour choisir une méthode maximisant la capacité.

MOTION – Method for the Optimization of Traffic Signals In On-line controlled Networks [26] est un système qui obtient l'information nécessaire à son optimisation par l'entremise de trois capteurs situés de façon stratégique : le premier à 40 mètres, un autre à 100 mètres et le dernier à 200 mètres. Le module d'optimisation est en fait une structure modulaire hiérarchisée qui comprend le niveau stratégique, le niveau tactique et le niveau opérationnel. Premièrement, l'information ayant trait à la détermination des temps de vert est envoyée à chaque carrefour. En fonction des informations calculées, un temps de cycle commun est imposé à chaque carrefour. Ce temps de cycle est recalculé pour tenir compte des différentes données de chaque carrefour. Le décalage est ensuite déterminé avec l'aide d'un indicateur de performance. Deux possibilités s'offrent pour déterminer le décalage, minimiser les retards ou assurer une coordination des plans de feux en début de vert. Ce niveau est répété chaque 10 à 15 minutes. Le niveau tactique détecte les incidents et modifie ensuite les plans de feux. Le niveau opérationnel est la modification du temps de vert compte tenu des différentes contraintes. Ce système permet également de tenir compte de la priorité accordée aux autobus.

À notre connaissance, le système le plus récent est CRONOS – Control of Networks by Optimization of Switchovers [3]. Il a été développé en 1990. Tout comme PRODYN, il élimine la notion de cycle. Il permet en plus d'éliminer la notion de phase prédéfinie, ce qui veut dire que la séquence des flux ayant le vert n'est pas constante dans le temps mais change selon les besoins de la circulation. Pour ce faire, on doit déterminer la compatibilité des différents flux pour ne pas mettre en

conflit des flux qui pourraient engendrer un accident. Le système permet aussi de modéliser selon deux différentes approches : l'approche centralisée et l'approche décentralisée. Les capteurs utilisés sont des capteurs à caméras vidéo qui prennent les mesures de la circulation à chaque seconde ou à quelques secondes d'intervalles. Si des boucles magnétiques sont déjà implantées au niveau des carrefours traités, l'information venant de ceux-ci sera également utilisée.

CRONOS est composé de trois modules différents : prévision, simulation et optimisation. Le module de prévision permet de prédire les arrivées sur les différents flux. Lorsque l'approche centralisée est utilisée, les arrivées sur les flux sont calculées à partir de l'information provenant des autres carrefours. Si l'approche décentralisée est utilisée, l'arrivée des véhicules est déterminée en utilisant l'information provenant du module de simulation.

Le module de simulation permet de déterminer les déplacements des différents véhicules en se basant sur certaines hypothèses qui ne sont malheureusement pas disponibles dans la documentation du produit. Ce module permet aussi de modéliser l'accumulation des véhicules aux différents carrefours en considérant l'espace occupé par les véhicules dans chaque flux et ainsi permet de tenir compte des effets de blocage dus à la présence d'un trop grand nombre de véhicules dans une ou plusieurs approches.

Le module d'optimisation permet de minimiser le temps total d'attente de l'ensemble des véhicules présents dans le ou les carrefours en utilisant l'algorithme de Box [5, 15] qui permet l'optimisation simultanée de plusieurs intersections. Cet algorithme permet de trouver le maximum (minimum) d'une fonction non linéaire ayant des contraintes d'inégalité non linéaires en générant premièrement un certain nombre de points

réalisables ainsi que d'autres points générés aléatoirement. Le centroïde de tous ces points est ensuite calculé. Si les points choisis ne respectent pas les contraintes, ils sont déplacés d'une distance δ à l'intérieur du domaine réalisable ou tout simplement déplacés d'une valeur égale à la moitié de la distance du centroïde trouvé afin de les rendre réalisables. La fonction objectif est ensuite évaluée en chacun des points et celui nous donnant la plus petite (grande) valeur est remplacé par un nouveau point en utilisant la formule suivante :

$$x'_{i,j} = \alpha (\bar{x}_{i,c} - x_{i,j}) + \bar{x}_{i,c}$$

où $x'_{i,j}$ représente le nouveau point et $x_{i,j}$ l'ancien point, α la distance de déplacement, et $\bar{x}_{i,c}$ le centroïde des points. Si, après plusieurs itérations, le point qui donne la plus petite (grande) fonction objectif est toujours le même, le point est déplacé de la moitié de la distance du centroïde en tenant toujours compte des contraintes. Si après γ itérations consécutives, la valeur de la fonction objectif diffère de β pour tous les points, on arrête le module d'optimisation. C'est le critère d'arrêt de la méthode.

CRONOS a été très performant lors de différents tests. Toutefois, l'algorithme de Box sur lequel il repose est une « heuristique » d'optimisation globale qui est a priori un peu dépassée et qui n'exploite aucunement la structure du problème à résoudre. Des améliorations seraient peut-être possibles en ayant recours à des heuristiques modernes potentiellement plus efficaces telles la recherche à voisinage variable.

Tableau 2.1 Tableau synthèse des différents systèmes de gestion des
feux de circulation

NOM	OBJECTIF	MODULE D'OPTIMISATION
Morgan et Little	Optimisation des décalages de différents flux sur une artère.	Maximise la bande verte
Brooks	Optimisation des décalages de différents flux sur une artère.	Maximise la bande verte
TRANSYT	Optimisation des décalages et de la répartition des durées de vert.	Minimise l'indice de performance : la somme de tous les véhicules à l'arrêt sur l'ensemble des intersections considérées ainsi que la somme du nombre moyen de véhicules dans les files d'attente pour chaque flux à chaque intersection.
SCOOT	Optimisation de la répartition des temps de vert, des temps de cycle et les décalages des feux de circulation à l'intérieur d'un réseau.	Minimise l'indice de performance : la somme pondérée du nombre de véhicules arrêtés sur tous les flux du carrefour et la longueur de la file d'attente sur tous les flux.
SCATS	Optimisation de la répartition de vert, les décalages et les durées de cycle.	Minimise la somme des retards et des arrêts pour chaque carrefour dans un réseau.
PRODYN	Optimisation du temps de vert et du décalage.	Minimise le retard total approximé par la longueur des queues calculées sur chaque flux pour tous les carrefours.
OPAC	Optimisation de la commutation des feux pour chaque carrefour dans un réseau.	Minimise l'indice de performance : la somme du temps total d'attente des véhicules.
MOVA	Optimisation de la gestion des feux au niveau des carrefours isolés.	Minimise les retards et les arrêts.
MOTION	Optimisation du temps de vert et du décalage.	Minimise les retards ou assure une coordination des plans de feux en début de vert.
CRONOS	Optimisation du temps de vert et du décalage.	Minimise le temps total d'attente de l'ensemble des véhicules présents dans le ou les carrefours.

Chapitre 3 – Définition du problème

Ce chapitre décrit le problème traité dans ce mémoire ainsi que son contexte. Il est constitué de trois sections : la première est consacrée à l'énoncé du problème et de l'approche de résolution étant donné le contexte de gestion en temps réel, la deuxième présente le modèle mathématique devant être résolu à chaque étape, la troisième fera état d'une illustration de notre approche ainsi que des différents liens entre notre approche avec les travaux antérieurs et la quatrième présente notre modèle de simulation conçu afin de suivre l'évolution des véhicules à l'intérieur du carrefour.

3.1 Gestion d'une intersection dans un contexte de STI et énoncé du problème

Un plan de feux statique (PFS) est utile lorsqu'on possède une certaine information historique sur l'arrivée des véhicules. Il peut être construit et optimisé à l'aide de données moyennes sur la circulation qui ont été prises sur une longue période de temps. L'arrivée des STI a permis d'avoir accès à l'information du temps d'arrivée des véhicules, de leur vitesse, etc. en temps réel. Ces dernières informations sont moins pertinentes lorsqu'un PFS est utilisé à un carrefour puisqu'il ne sera pas capable de s'ajuster à la variabilité naturelle des flux. Par conséquent, il ne peut réagir aux conditions changeantes de la circulation, il ne pourra donc que les subir. Ceci engendre des solutions jugées moyennement satisfaisantes. Cependant, un plan de feux adaptatif (PFA) sera capable

de s'ajuster autant à des conditions de circulation stables que variables. C'est en fait pour cette raison qu'il devient plus intéressant de traiter les données stochastiques du système provenant des STI en utilisant un PFA. Les STI permettent d'avoir des données précises à intervalles réguliers, ce qui permet au PFA de modifier le plan de feux actuellement en cours pour l'ajuster aux nouvelles conditions observées. Le PFA pourra ainsi s'adapter aux conditions de circulation lors de variations importantes provoquées par : le climat, les accidents, les heures de pointe, etc.

La gestion en temps réel d'un feu de circulation dans un contexte de STI cherche de son côté à déterminer la séquence de temps de vert des différents flux d'un carrefour qui permette de minimiser le temps total de séjour des usagers traversant ledit carrefour en ajustant ces décisions aux conditions changeantes de trafic. Plusieurs difficultés doivent être considérées lors de la résolution de ce problème. Nous devons entre autres, tenir compte de la compatibilité entre les flux afin d'éviter les conflits entre les véhicules (i.e. les flux ayant le feu vert en même temps doivent être compatibles). Nous devons aussi nous assurer que le temps d'arrêt total d'un véhicule à un carrefour ne dépasse pas un certain seuil maximal d'attente. Enfin, le problème à résoudre se situe dans un environnement de gestion en temps réel, il faudra donc que l'approche retenue utilise un modèle qui puisse se résoudre rapidement afin qu'on puisse ensuite actualiser l'information du modèle et recommencer ce processus à intervalles réguliers.

Notre objectif est de contrôler un feu de circulation pendant un horizon de planification prédéfini. Afin d'optimiser le temps total de séjour des véhicules sur tout l'horizon, nous procédons comme suit. Au début de l'horizon, l'information des véhicules présents au carrefour, leur position exacte ainsi que leur vitesse, est mise à jour à l'aide du STI. Avec cette

information et en simulant la réaction des véhicules sur un certain horizon de temps, on peut calculer le temps total de séjour des usagers pour un plan de feux donné. L'approche de gestion en temps réel consiste donc, à partir d'un plan de feu initial, à mettre en œuvre la première phase de celui-ci, puis à chercher de nouveaux plans de feu en résolvant une version réduite du problème global ne tenant compte que de l'information actuellement disponible et qui évalue la qualité de plans de feux alternatifs sur un horizon plus restreint (qu'on appellera l'horizon d'optimisation). Au bout d'un laps de temps relativement court, le meilleur plan de feu obtenu en résolvant le problème réduit est retenu, sa première phase est implantée, les informations sur les véhicules qui sont dans le carrefour à présent sont mises à jour et le processus est répété. Cette résolution et mise à jour répétée de l'information nous permet ainsi d'ajuster le plan de feu dynamiquement en fonction des conditions de trafic observées.

Le laps de temps accordé afin de résoudre le problème réduit incluant le temps de mise à jour de l'information des véhicules déjà présents et de ceux entrés depuis la dernière mise à jour est ce qu'on appellera familièrement le temps de *tic*. Afin de déterminer la performance de notre modèle, le calcul de plusieurs mesures est effectué. L'horizon d'optimisation est ensuite déplacé dans le temps pour une durée qui est identique au *tic*. On résout alors le nouveau problème réduit et ceci se répète jusqu'à ce que tout notre horizon de planification soit optimisé. Ce processus permet donc de résoudre le problème global en utilisant le principe d'horizon glissant et en mettant à jour l'information à intervalles assez proches on peut alors ajuster les décisions du plan de feu qui est réellement mis en place dynamiquement au fur et à mesure que les conditions de trafic sont observées. On a donc bien une gestion en temps réel.

3.2 Formulation mathématique du problème réduit

Soient :

$t_i(x)$ = temps de sortie du véhicule i en fonction du plan de feux x ;

x = matrice qui définit le plan de feux, $x = (f_k) = (f_1, f_2, f_3, \dots)$;

X = ensemble de tous les plans de feux possible;

n = nombre total de véhicules dans le carrefour;

T = horizon d'optimisation;

$d_k(x)$ = durée de la phase k du plan de feux x ;

$[\alpha_{jj'}]$ = matrice de compatibilité des flux où $\alpha_{jj'} = 1$ si flux j et j' sont compatibles et $\alpha_{jj'} = 0$ sinon;

$f_k(x)$ = ensemble des flux j ayant le vert durant la phase k du plan de feux x ;

Le problème de gestion en temps réel d'un feu de circulation dans le contexte des STI sur un horizon d'optimisation T (i.e. le problème réduit décrit à la section précédente) peut s'écrire comme suit :

$$\underset{x \in X}{Min} \quad \sum_{i=1}^n \min(t_i(x), T) \quad (1)$$

$$\sum_k d_k(x) = T \quad (2)$$

$$d_k(x) \geq d_{\min} \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \neq j'} \alpha_{jj'} = \text{card}(f_k(x)), \forall (j, j') \in f_k(x), \forall k \in K \quad (4)$$

$$x \in X$$

La fonction objectif du modèle (1) est la somme du minimum entre le temps de sortie et l'horizon d'optimisation pour chaque véhicule présent dans le carrefour au début de l'horizon d'optimisation. Elle sert donc à minimiser le temps total de séjour des usagers en faisant varier le plan de feux dans le but de s'adapter à la demande. Le modèle comprend quatre familles de contraintes. La première (2) nous indique que la

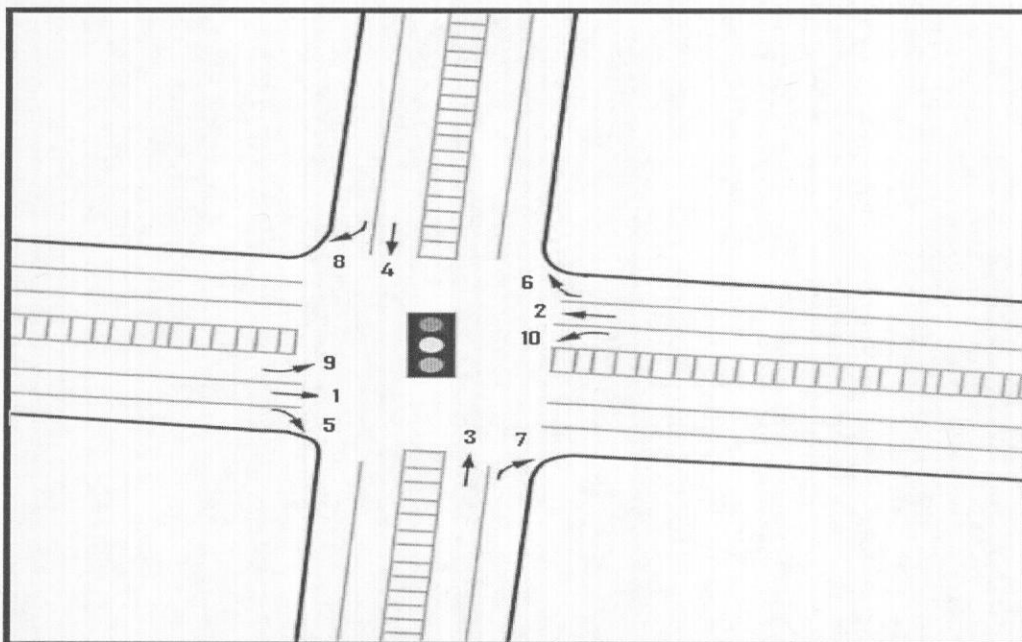
somme des durées des phases doit être égale à l'horizon de planification du problème réduit, c'est-à-dire au paramètre T . Les contraintes (3) s'assurent que la durée de chaque phase est plus grande ou égale à un minimum qui correspond au temps d'ordinateur disponible pour résoudre le problème que nous appellerons familièrement le *tic*. Les contraintes (4) permettent de construire des plans de feux de sorte que tous les flux compris dans une phase soient compatibles entre eux afin d'éviter des conflits entre les véhicules. Nous avons que $\alpha_{jj'}$ est égal à 1 si j et j' sont compatibles et 0 sinon. Ces trois contraintes sont respectées d'emblée puisqu'elles sont très simples à respecter. La quatrième et dernière famille de contraintes qui n'est pas représentée ci-dessus est en fait un objectif secondaire du problème qui s'assure que le seuil d'attente maximal pour un feu vert ne peut être atteint plus qu'une fois par flux pendant la durée de l'horizon d'optimisation ce qui veut dire qu'un véhicule ne peut pas rester à l'arrêt à un flux pendant une durée plus grande que le seuil d'attente maximal. Cette contrainte est imposée par l'entremise d'une pénalité ajoutée à la fonction objectif. Elle vise à établir une sorte d'équité entre les différents véhicules en empêchant de favoriser un flux par rapport à un autre lorsque celui-ci contient plus de véhicules et représente un plus grand poids dans la fonction objectif. Cependant, il est possible que toutes les solutions proposées par notre modèle violent cette contrainte. Dans ce cas, la meilleure solution proposée par notre voisinage sera choisie.

3.3 Illustration de l'approche et liens avec les travaux antérieur

Afin de mieux illustrer les concepts de l'approche de résolution proposée nous avons construit le petit exemple suivant décrivant un plan de feu statique et un plan de feu dynamique obtenu par une démarche d'horizon glissant comme nous venons de décrire. Le

carrefour étudié comprends 10 flux différents et il est représenté à la figure 3.1.

Figure 3.1 : Carrefour à 10 flux



Le premier tableau ci-dessous présente l'exemple d'un plan de feux statique. Dans cet exemple, par souci de simplicité, les flux qui composent les phases ainsi que le temps de phase seront toujours identiques d'un cycle à l'autre. Au début du premier cycle, les flux 1, 2, 5 et 6 ont le feu vert pendant 30 secondes. Pour la phase suivante, les flux 3, 4, 7 et 8 ont droit au feu vert pendant 20 secondes alors que tous les autres flux ont le feu rouge. Pour la dernière phase du cycle, les flux 9, 10, 7 et 8 ont droit au feu vert pendant 20 secondes. On voit très bien que le 2^{ème} cycle est identique au 1^{er} cycle.

Tableau 3.1 - Exemple d'un plan de feux statique

	1er cycle				2e cycle			
Flux	1	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>9</i>	1	<i>1</i>	<i>3</i>	<i>9</i>
	2	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>10</i>	2	<i>2</i>	<i>4</i>	<i>10</i>
	5	<i>5</i>	<i>7</i>	<i>7</i>	5	<i>5</i>	<i>7</i>	<i>7</i>
	6	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>8</i>	6	<i>6</i>	<i>8</i>	<i>8</i>
Durée	10	<i>20</i>	<i>20</i>	<i>20</i>	10	<i>20</i>	<i>20</i>	<i>20</i>
Temps	10	30	50	70	80	100	120	140

Le deuxième tableau montre un plan de feux adaptatif. Dans ce tableau nous ne retrouvons plus de cycle. Les phases en gras sont celles en cours lors de l'optimisation donc elles ne peuvent pas être optimisées et leur temps est égal au tic. La phase 1 est identique au 1^{er} cycle du plan de feu statique. Donc pendant la phase 1, les flux 1, 2, 5 et 6 ont le feu vert alors que notre modèle optimise les phases subséquentes en minimisant le temps total de séjour des usagers en considérant l'impact qu'aura la prochaine phase sur les véhicules qui sont déjà dans le système. Dans la phase 2, les flux 1, 2, 5 et 6 ont encore le droit au feu vert mais on peut remarquer que les phases suivantes ont été modifiées. Le premier changement au plan de feux initial survient à la phase 5. Le plan de feux initial aurait alloué le feu vert aux flux 3, 4, 7 et 8 alors que notre modèle a trouvé une solution meilleure qui donne le feu vert aux flux 6, 5, 1 et 2. Cette optimisation se continue jusqu'à ce qu'on ait atteint la fin de notre horizon de planification.

Les systèmes PRODYN [7, 12] et CRONOS [3] sont, à notre connaissance, les premiers à ne pas utiliser le concept de cycle et à se baser sur une notion de phase qui n'est pas fixée dans le temps. Notre modèle s'inspire des modules d'optimisation de ces deux systèmes dans le sens qu'il adopte également ces deux caractéristiques. Par contre notre objectif consiste à minimiser le temps de séjour total des usagers à un carrefour contrairement à leur temps d'attente. Le temps d'attente correspond au temps auquel un véhicule est à l'arrêt alors que le temps de séjour est le temps nécessaire pour qu'un véhicule traverse la totalité d'un carrefour, depuis son entrée jusqu'à sa sortie du carrefour tel que délimité par les mécanismes de détection du STI. Cet objectif nous apparaît plus intéressant du point de vue des conducteurs et des gestionnaires de trafic car il considère la totalité du temps passé dans le carrefour plutôt que de se restreindre au seul temps passé à l'arrêt. D'autre part, puisque nous sommes dans un contexte de temps réel, nous comptons résoudre notre module d'optimisation à l'aide d'une heuristique moderne très efficace et très rapide, soit la recherche à voisinage variable, plutôt que l'algorithme de Box utilisé dans CRONOS dont la conception date et risquerait d'être dépassée à l'heure actuelle. Cette méthode de recherche devrait nous permettre de trouver très rapidement des solutions de qualité. Notre modèle considère également, tout comme CRONOS, des effets de blocage dus à la présence d'un trop grand nombre de véhicules dans une ou plusieurs approches.

Tout comme SCOOT et SCATS, notre modèle n'anticipe pas la demande des véhicules. Il va plutôt, à partir de l'information provenant des capteurs, mettre à jour l'information des véhicules à un intervalle donné. L'évolution des véhicules est cependant simulée entre deux intervalles afin d'ajuster notre plan de feux dans le but d'optimiser la fonction objectif.

3.4 Simulation

Afin d'évaluer la performance de notre approche, l'information exacte des véhicules circulant à un carrefour est nécessaire. Idéalement, il aurait fallu tester notre modèle sur un carrefour existant et comparer sa performance par rapport à celle des différents systèmes discutés dans la revue de littérature. Malheureusement, nous n'avons pas accès à un tel carrefour et nous n'avons pas assez d'information sur les différents modèles afin de les reproduire et de comparer leurs résultats avec les nôtres. Nous avons donc conçu un simulateur qui modélise le comportement des véhicules aux différents flux du carrefour. Ce simulateur nous permet de reproduire le comportement des usagers en générant les observations qui proviendraient normalement des détecteurs. Le simulateur est utilisé à deux fins : le module intérieur et le module extérieur. Le module intérieur est nécessaire à l'optimisation. Il optimise le temps de séjour des usagers en simulant leur comportement ce qui nous permet de trouver une solution du prochain plan de feux. Le module extérieur permet de générer des données en utilisant la loi de Poisson, pour simuler l'arrivée réelle des différents véhicules dans l'intersection au fur et à mesure que le temps s'écoule. Ceci permet de remplacer les informations du STI et d'évaluer la performance de la méthode dans son ensemble.

Notre outil de simulation permet de déterminer la vitesse ainsi que la position de chaque véhicule présent dans le carrefour. L'information provenant des capteurs situés en amont sur chaque flux est le temps d'arrivée des véhicules dans le carrefour ainsi que leur vitesse. Cette information ainsi que l'état du plan de feux permettent de calculer la nouvelle position et vitesse des véhicules. Le comportement des véhicules varie selon le type de flux auquel ils appartiennent (tourne à

gauche, tourne à droite et va tout droit), de sa situation initiale ainsi que de l'état du feu de circulation.

Dans le cas où le feu serait rouge, un véhicule présent dans un flux menant à ce feu rouge peut : être à l'arrêt, aller à une vitesse constante ou bien décélérer pour se placer à la ligne d'arrêt ou en arrière du dernier véhicule stoppé. Un véhicule peut aussi se retrouver dans une situation où il était à l'arrêt et doit accélérer puisque les véhicules devant lui se sont avancés pendant la période de vert précédente. Lorsque le feu de circulation est vert, un véhicule peut : décélérer parce qu'il doit tourner, aller à une vitesse constante ou tout simplement accélérer puisqu'il était à l'arrêt ou en pleine décélération.

Chapitre 4 - Approche de résolution

4.1 Introduction

Nous avons résolu le problème de contrôle des feux de circulation à l'aide d'une heuristique contrairement à une méthode exacte pour deux raisons simples. Premièrement, les instances réelles du problème à résoudre sont de taille très importante et sont trop difficiles à résoudre de façon exacte. Notre carrefour de base est composé de 10 flux. De quatre à 32 véhicules peuvent être présents sur un flux à un instant donné et environ 3 à 5 véhicules peuvent rentrer à chaque tic. Ceci dit, à chaque fois qu'une nouvelle solution est générée par un voisinage on doit simuler la réaction d'un minimum d'environ 70 véhicules sur le carrefour, ce qui est non négligeable. Deuxièmement, le temps dont l'on dispose pour optimiser le plan de feux est trop court comparativement au temps nécessaire pour trouver la solution exacte, car on doit optimiser en temps réel. L'heuristique de recherche à voisinage variable a été choisie parmi diverses autres heuristiques possibles à cause tout particulièrement de sa simplicité, de sa flexibilité et surtout de sa rapidité d'exécution.

4.2 Les méthodes de recherche à voisinage variable

La méthode de recherche à voisinage variable (Variable Neighborhood Search - VNS) [9] est une famille d'heuristiques qui date de la fin des

années 90 (à notre connaissance, la première référence est datée de 1999). Cette méthode a suscité beaucoup d'intérêt et s'est montrée très performante. Elle permet même dans certains cas de trouver la solution optimale ou une solution très près de l'optimum. C'est une méthode qui nécessite l'ajustement de peu de paramètres, qui est très rapide, qui est simple à implanter et à calibrer comparativement à d'autres méthodes heuristiques.

Le VNS a comme avantage d'explorer plusieurs voisinages qui doivent être définis de prime abord, étape importante et difficile. On trouve par la suite une solution initiale et à partir de celle-ci, une méthode de recherche locale est utilisée afin de trouver le minimum local à l'intérieur du voisinage. Cette recherche locale est en fait un algorithme de descente. Trois possibilités sont envisageables lorsqu'une nouvelle solution est trouvée : la solution est la même que la précédente, elle est moins bonne ou elle est meilleure que la solution trouvée précédemment. Dans le dernier cas, nous continuons l'exploration en utilisant toujours notre méthode de recherche locale. Dans les deux autres cas, nous passons au prochain voisinage. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de voisinage à visiter ou jusqu'à ce qu'on ait atteint une des conditions d'arrêt suivantes : temps de calcul maximum, un nombre maximum d'itérations ou lorsque l'on a atteint un nombre maximum d'itérations prédéterminées entre 2 améliorations.

Une variante du VNS est le VND. Sa méthode diffère dans la façon de visiter chacun des voisinages. Le VNS choisira une solution à l'intérieur d'un voisinage pour ensuite utiliser la méthode de descente alors que le VND visitera de façon exhaustive toutes les solutions à l'intérieur d'un voisinage pour ensuite utiliser la méthode de descente. Le VND permet de visiter différentes solutions à l'intérieur d'un même voisinage alors

que le VNS permet de visiter plusieurs solutions à l'intérieur de plusieurs voisinages. Dans ce mémoire, nous utilisons le VND.

Plusieurs questions se posent lors de l'utilisation d'un VNS et d'un VND. Combien de voisinages devraient être utilisés et lesquels ? Dans quel ordre devrait-on les faire intervenir ? Quelle stratégie devrait-on utiliser pour changer de voisinage ? Devrait-on utiliser une stratégie de recherche locale basée sur la meilleure ou sur la première amélioration rencontrée ? Dans le cas où on choisit de prendre la meilleure amélioration, plusieurs solutions sont générées, toujours à partir de la solution initiale, et la meilleure solution parmi toutes celles-ci est conservée. À l'opposé, la première amélioration conservera chaque fois la meilleure solution entre la nouvelle et l'ancienne solution et construira une nouvelle solution à partir de celle-ci.

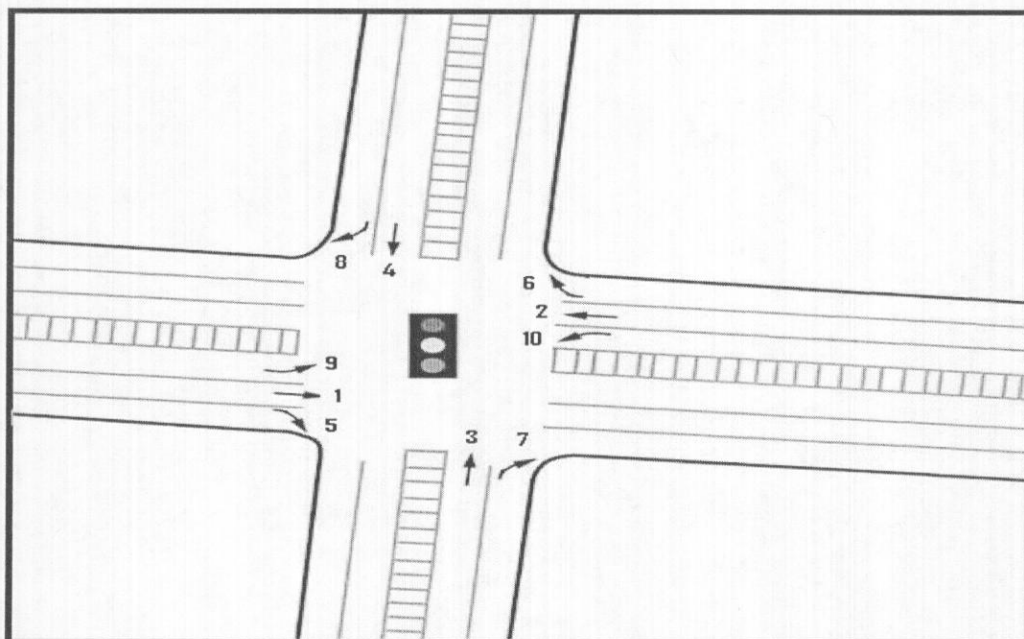
Dans les sections suivantes, nous présentons la méthode que nous avons développée afin de déterminer notre plan de feux initial ainsi que les différents types de voisinages utilisés dans ce problème précis. Nous discuterons des questions qui doivent être abordées lors de la conception des voisinages et de leur implantation.

4.3 Obtention du plan de feux

Afin d'établir un plan de feux, il faut tenir compte de plusieurs aspects : la géométrie du carrefour, la priorité des différents flux ainsi que leur compatibilité. La priorité des flux est une donnée du problème et est déterminée par le degré de saturation. Plus le degré de saturation d'un flux est important, plus ce flux devient prioritaire. Cette importance se traduit par la numérotation que l'on assigne aux flux. Donc si on a dix flux, le flux 1 est celui qui en général a le degré de saturation le plus

important alors que le flux 10 a en général le degré de saturation le moins important. Un flux sera compatible avec un autre flux si on peut leur attribuer le feu vert simultanément sans créer de conflit entre les véhicules de ces 2 flux. Nous illustrerons les principes sur l'exemple du carrefour introduit au chapitre précédent dont nous reprenons ici la figure pour faciliter le compréhension.

Figure 4.1 : Carrefour à 10 flux



Pour la construction d'un plan de feux, il est avant tout nécessaire d'avoir l'information concernant la compatibilité des flux. Pour notre exemple, cette compatibilité est indiquée dans le tableau 4.1. Dans ce tableau, un « 1 » signifie que deux flux sont compatibles alors qu'un « 0 » indique qu'ils ne le sont pas.

Tableau 4.1 Tableau de compatibilité pour un carrefour comprenant
10 flux

Flux	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0
2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1
3	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
4	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
5	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0
6	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
7	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1
8	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
9	1	0	0	0	1	0	1	1	0	1
10	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0

Notre plan de feux est conçu de façon à ce que chaque flux apparaisse au moins une fois dans notre horizon d'optimisation afin qu'ils y disposent tous d'un temps de vert. On commence à construire le plan de feux en allouant le temps de vert au flux le plus important, donc le premier selon notre système de numérotation par ordre d'importance décroissant. On vérifie ensuite si le deuxième est compatible avec le premier. Dans le cas où il est compatible, le feu vert lui est alloué sinon on passe au suivant, jusqu'à ce qu'on ait examiné tous les flux. Chaque nouveau flux que l'on ajoute doit être compatible à tous ceux déjà présents dans la phase. Dans notre exemple :

- le flux 2 est compatible au flux 1 donc on peut lui allouer le feu vert
- le flux 3 et le flux 4 sont incompatibles avec les deux autres alors ils auront le feu rouge
- le flux 5 et 6 sont compatibles entre eux et sont aussi compatibles avec les flux 1 et 2 donc ils sont rajoutés dans la phase

- les flux 7, 8, 9 et 10 auront droit au feu rouge puisqu'ils sont incompatibles à tous les autres flux dans la phase.

Pour construire les prochaines phases, on utilise premièrement les flux qui n'ont pas encore eu le vert parce qu'ils ont priorité sur les autres. Une fois le plan de feux terminé, on vérifie s'il y a possibilité d'ajouter des flux à la fin de la phase. Les flux 7 et 8 sont déjà présents dans le plan de feux mais puisqu'ils sont compatibles aux flux 9 et 10, on les rajoute dans la phase 4.

Chaque phase a une durée définie par le plan de feux. La première phase se voit allouer un temps delta égal au tic. La durée des autres phases est tout simplement le temps total du plan de feux moins le temps du tic divisé par le nombre de phases restant. Cette durée devient alors le temps pour toutes les phases subséquentes. La longueur des phases est représentée sous forme de nombres entiers. Cela implique qu'une de celle-ci peut être plus longue que les précédentes. Dans notre cas, cette phase est la dernière du plan de feux. En fait, la répartition du temps entre les phases du plan de feux pourrait être faite de nombreuses façons : sur la base du volume du flux le plus important de chaque phase, sur la base du temps prévu pour vider le flux, le plus long en terme de temps, etc. Le temps de phase doit cependant être plus grand qu'un minimum déterminé à l'avance. Ce minimum est naturellement plus grand ou égal au tic. Le temps d'horizon pour cet exemple est de 60 secondes alors que le tic est de 10 secondes. Le résultat final du plan de feux est illustré ci-dessous.

Tableau 4.2 Plan de feux pour un carrefour à 10 flux

Phase	1	2	3	4
Flux	1	1	3	9
	2	2	4	10
	5	5	7	7
	6	6	8	8
Durée	10	20	20	20
Temps	10	30	50	70

4.4 Définition des différents voisinages utilisés par le VND

Cette section est consacrée à la description des différents voisinages et de la recherche locale utilisée lors de la résolution du problème. Quatre approches différentes sont décrites à l'aide de l'exemple décrit ci-dessus. Les changements engendrés par les voisinages ne seront faits qu'à partir de la deuxième phase puisque la première est celle qui est implantée au moment de l'optimisation. La dernière section de ce chapitre portera sur la stratégie utilisée pour faire la gestion des changements de voisinage.

4.4.1 Changement de flux dans une phase donnée

Le changement effectué en ce qui concerne le plan de feux est fait au niveau des flux et il consiste à remplacer un flux par un autre. Naturellement, celui qui est introduit doit être compatible avec les autres flux déjà présents dans la phase du plan de feux traitée. De plus, un flux ne peut être enlevé que si celui-ci apparaît plus qu'une fois dans le plan de feux, puisque chacun d'entre eux doit avoir du temps de vert dans l'horizon d'optimisation. Si un changement est possible et que d'autres

flux sont compatibles avec ceux déjà présents dans la phase, nous le rajoutons. Les flux 7 et 8 sont les seuls flux qui apparaissent plus d'une fois dans notre plan de feux. Néanmoins, ils ne peuvent être remplacés, puisqu'ils ne remplissent pas les conditions de compatibilité.

4.4.2 Échange de phases dans le plan de feux

Ce voisinage permet de faire des changements dans la séquence des phases du plan de feux. Il permet d'échanger 2 phases sans modifier leur contenu (les flux et la durée de la phase). Par exemple, les flux et la durée de la phase 2 peuvent être échangés contre ceux de la troisième et vice versa. Toutes les combinaisons possibles sont effectuées. Dans notre exemple, nous essayerons ensuite de changer les flux et la durée de la phase 2 avec la phase 4 comme illustré dans le tableau 4.3. La prochaine combinaison serait effectuée entre les phases 3 et 4.

Tableau 4.3 Échange de phases dans un plan de feux

Avant					Après				
Phase	1	2	3	4	Phase	1	2	3	4
Flux	1	1	3	9	Flux	1	3	1	9
	2	2	4	10		2	4	2	10
	5	5	7	7		5	7	5	7
	6	6	8	8		6	8	6	8
Durée	10	20	20	20	Durée	10	20	20	20
Temps	10	30	50	70	Temps	10	30	50	70

4.4.3 Changement de durée de phases

Le changement de durée de phase est très simple. Il s'agit en fait d'augmenter le temps d'une phase d'une petite quantité ϵ et de l'enlever à une autre. On pourrait ainsi ajouter 10 secondes à la phase 2 pour

l'enlever à la troisième comme on peut voir dans le tableau ci-dessous. Le changement suivant impliquerait qu'une valeur epsilon serait rajoutée à la phase 2 et serait enlevée à la quatrième. La phase 1 ne serait pas touchée dans ce cas-ci. Cette méthode serait ensuite utilisée sur la prochaine phase, et ainsi de suite. Un changement ne peut être effectué que si la contrainte de temps minimum des phases est respectée.

Tableau 4.4 Changement de durée de phases

Avant

Phase	1	2	3	4
Flux	1	1	3	9
	2	2	4	10
	5	5	7	7
	6	6	8	8
Durée	10	20	20	20
Temps	10	30	50	70

Après

Phase	1	2	3	4
Flux	1	1	3	9
	2	2	4	10
	5	5	7	7
	6	6	8	8
Durée	10	30	10	20
Temps	10	40	50	70

4.4.4 Élimination d'une phase

Le retrait d'une phase implique que nous enlevons du temps de vert à certains flux pour le redistribuer à une autre phase. Ceci implique que la numérotation des phases subséquentes est actualisée. La durée de la phase éliminée est tout simplement rajoutée à la phase suivante. Par contre, si la dernière phase est éliminée, la durée est rajoutée à la phase précédente. Ceci est illustré à l'aide du tableau 4.5 qui élimine la phase 3.

Tableau 4.5 Retrait de la phase 3

Avant

Phase	1	2	3	4	5
Flux	1	1	3	3	9
	2	2	4	4	10
	5	5	7	7	7
	6	6	8	8	8
Durée	10	20	10	10	20
Temps	10	30	40	50	70

Après

Phase	1	2	3	4
Flux	1	1	3	9
	2	2	4	10
	5	5	7	7
	6	6	8	8
Durée	10	20	20	20
Temps	10	30	50	70

4.5 Stratégie de gestion des changements de voisinage

Nous utilisons le principe de VND afin de visiter les différents voisinages. À chaque fois que nous explorons un voisinage, nous évaluons le temps de calcul cumulé. Si ce dernier est trop près de la valeur du tic, l'exploration des voisinages est arrêtée et nous faisons la mise à jour du système. La gestion des changements de voisinages consiste premièrement à faire des modifications sur le plan de feux initial en utilisant notre recherche locale, qui est en fait notre changement de durée des phases. Deuxièmement, les voisinages sont visités un par un. À chaque fois que l'exploration d'un voisinage est terminée, elle est suivie d'une descente de recherche locale. L'ordre des voisinages est le suivant :

1. changement de flux
2. changement de phase
3. élimination des phases

L'ordre dans lequel les voisinages sont visités est basé sur le potentiel d'amélioration des voisinages et aurait pu être faite autrement.

Une fois ce VND terminé, si la durée du temps cumulé le permet, nous passons à la troisième étape, faire un VNS. Une solution est trouvée en effectuant un seul changement aléatoire pour chacun des voisinages suivants : le changement de flux et le changement de phase. Une fois ces deux changements terminés, nous effectuons une descente. Ce processus est répété jusqu'à ce que le temps cumulé ait atteint le tic.

Notre stratégie de gestion des changements des voisinages dans le cas du VND est illustrée ci-dessous sous forme de pseudo-code. Cette stratégie est répétée jusqu'à ce que tous les voisinages aient été visités.

Pseudo-code

- construire solution initiale
- solution courante := solution initiale
- Best := solution initiale
- k := 0

Tant que le Temps Max pas atteint, faire :

1) Recherche locale

- appliquer le changement de durée à la solution courante en mode première amélioration
- si amélioration, mettre à jour solution courante et Best
 - solution courante := nouvelle solution
 - Best solution := nouvelle solution
- sinon remettre la solution courante égal à la meilleure solution trouvée

- solution courante := Best
- si toutes les possibilités ont été visitées et il n'y a plus d'améliorations
 - aller en 2
- sinon retourner en 1

2) Exploration des voisinages (VND)

- $k := k+1$
- explorer N_k (solution courante) en mode première amélioration
- si amélioration :
 - solution courante := nouvelle solution
 - Best := nouvelle solution
 - retourner en 2 et mettre $k := 0$
- sinon remettre la solution égale à la meilleure solution trouvée
 - Best := solution courante
- si toutes les possibilités ont été visitées et il n'y a plus d'améliorations
 - retourner en 1 et poser $k := 0$
- sinon retourner en 2 et mettre $k := 0$

Chapitre 5 – Résultats numériques

5.1 Introduction

Afin de tester notre approche, nous avons soumis les solutions obtenues par notre algorithme ainsi qu'un plan de feux statique à différentes conditions de circulation et ceci pour trois types de carrefour. Ces tests ont ensuite été analysés à l'aide de plusieurs critères de performance pour mesurer les bénéfices potentiels d'un PFA comme celui présenté ici. Nous avons ensuite évalué la sensibilité de notre modèle à la valeur du paramètre de temps maximal permis d'attente des usagers.

5.2 Critère de performance

L'analyse de notre PFA est basée sur le rendement de certains critères de performance : le temps total de séjour des usagers dans l'intersection (c.-à-d. la fonction objectif des VND), le temps total d'attente des usagers, la moyenne ainsi que la variance du temps total d'attente, le nombre de véhicules sortis du carrefour et le nombre de véhicules ne pouvant pas rentrer dans le carrefour. La fonction objectif est le premier indicateur du système et il nous permet de trouver le temps total de séjour des usagers dans le carrefour. Le deuxième indicateur est le temps total d'attente pour chacun des véhicules. Dans la méthode de PFA, nous avons introduit une contrainte souple sur le

temps maximum d'attente des véhicules à un carrefour. Cette contrainte vise à rendre plus équitable la gestion des flux en évitant qu'un véhicule appartenant à une approche ayant un faible degré de saturation ne soit bloqué trop longtemps parce qu'il est plus « rentable » globalement de donner la priorité à des approches à saturation élevée. Cette contrainte est traitée comme pénalité et donc toute phase de plan de feux implémentée qui la violerait occasionnerait un accroissement substantiel de la fonction objectif. La méthode adaptative aura donc tendance à ajuster les phases de plan de feux afin d'essayer dans la mesure du possible d'éviter ces pénalités. La valeur de temps d'attente maximale pour un véhicule a été fixée arbitrairement à 90 secondes ce qui nous semblait une durée d'attente maximale raisonnable. Dans la section 5.5, plusieurs tests seront présentés afin de voir l'impact du changement de cette valeur. Étant donné l'aspect de simulation, les approches peuvent devenir saturées et peuvent donc ne plus avoir l'espace physique pour accepter de nouveaux véhicules. Nous considérons alors que ces véhicules sont détournés ou changent tout simplement d'itinéraire. Afin de comparer les différents tests, ces véhicules sont comptabilisés et la fonction objectif est ajustée en conséquence. Les détails de cet ajustement seront expliqués dans une autre section.

5.3 Simulation des conditions de circulation aux carrefours

5.3.1 Caractéristiques de trafic

Un programme a été créé pour nous permettre de simuler l'entrée des véhicules dans le carrefour selon différentes conditions de circulation. Dans l'intention de reproduire adéquatement la réalité, nous avons conçu plusieurs catégories de flux de circulation. À chaque catégorie

correspond un intervalle de taux d'arrivée par $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$. Ces catégories sont représentées dans le tableau 5.1. Une loi uniforme est ensuite utilisée afin de générer le lambda spécifique dans un de ces intervalles correspondant à chacun des flux du carrefour. L'utilisation de lambdas potentiellement différents permet des taux d'arrivée différents et du fait, une meilleure représentation de la réalité. Le lambda trouvé à l'aide de la loi uniforme est ensuite utilisé afin de générer des temps inter arrivées avec une loi de Poisson. La vitesse des véhicules est ensuite générée avec une loi uniforme toujours en utilisant le concept d'une valeur minimum et maximum.

Tableau 5.1 Catégorie des différents lambdas utilisés

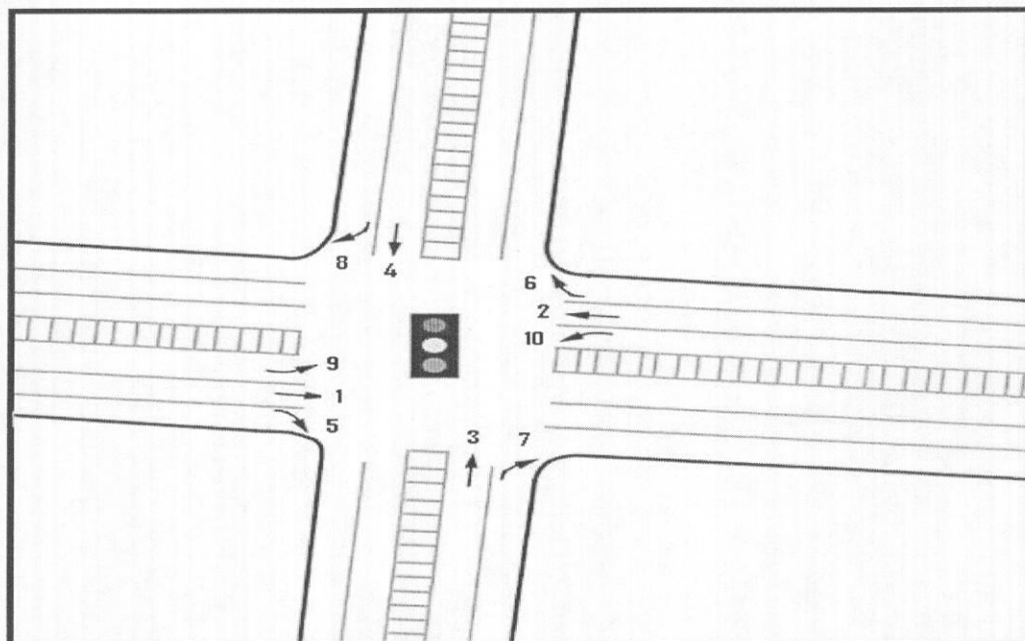
Catégorie	Minimum	Maximum
0	2	3
1	3	5
2	5	7
3	7	10
4	10	20

5.3.2 Caractéristiques des carrefours

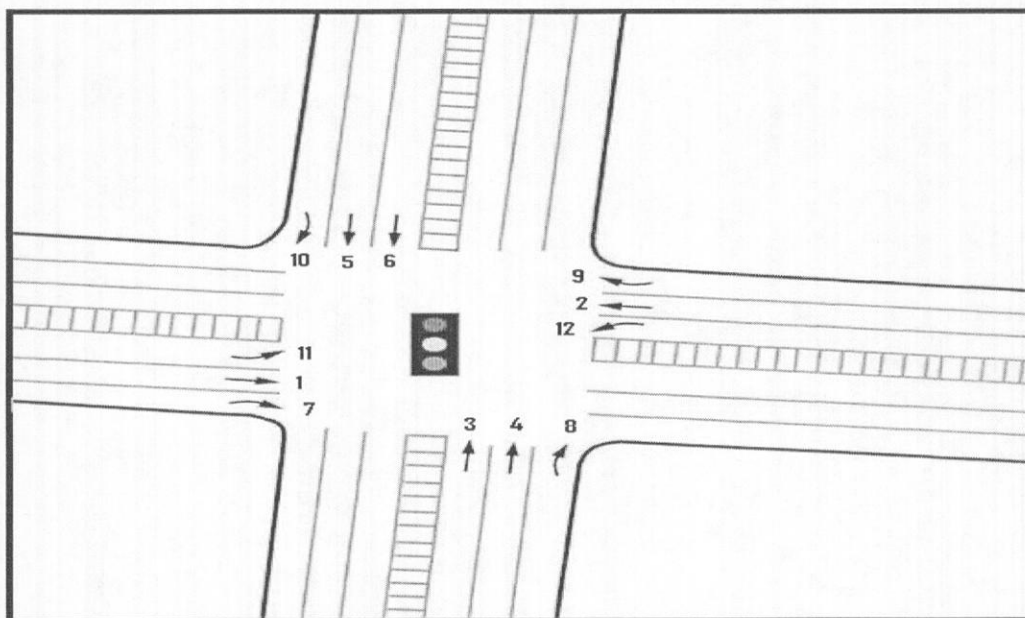
Nous avons testé notre modèle ainsi que le plan de feux statique sur trois carrefours différents illustrés ci-dessous. Le carrefour 1 est le carrefour de base pour nos tests. Il comprend des flux qui permettent d'aller tout droit, de tourner à gauche ou à droite. Le carrefour 2 comporte 2 voies de plus que le carrefour 1, voies qui permettent aux véhicules d'aller tout droit. Le carrefour 3 est le plus simple, il ne comprend que des flux allant tout droit ou à droite. Les flux ont été numérotés dans l'ordre de priorité de la moyenne du degré de saturation.

Figure 5.1 : Carrefours utilisés pour les simulations

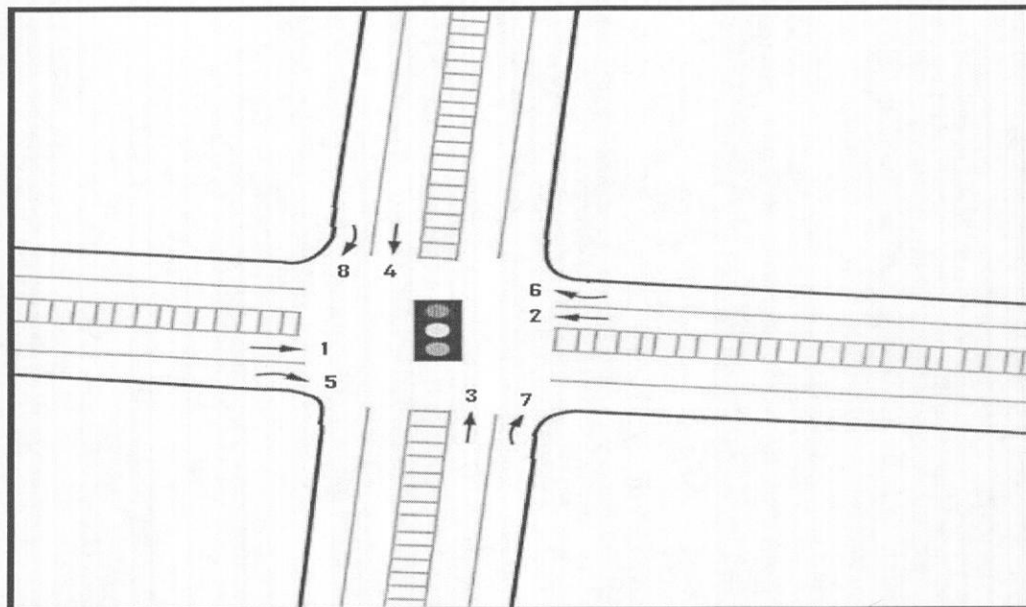
Carrefour 1



Carrefour 2



Carrefour 3



5.3.3 Hypothèses de la simulation

Plusieurs hypothèses ont été introduites afin de simplifier les aspects de simulation dans le problème : chaque flux ne peut contenir que des véhicules allant dans une direction (tout droit, à gauche ou à droite) et ils n'ont pas la possibilité de changer de voie dans la zone simulée qui correspond à une distance de 200 mètres avant le carrefour. Le nombre maximum de véhicules que peut contenir un flux est 33 puisque la longueur des approches est de 200 mètres et qu'on considère que les véhicules ont une longueur standard de 6 mètres. Cette mesure inclut une distance de sécurité permettant de séparer les véhicules. Ceux-ci ont tous la même accélération et leur vitesse ne dépasse jamais la limite légale permise. La longueur des approches est proportionnelle au nombre de véhicules pouvant se retrouver sur celle-ci donc plus l'approche est longue, plus elle peut contenir des véhicules. Ceci implique alors que le nombre de véhicules pouvant rentrer sur cette approche augmente.

5.3.4 Caractéristiques des différents tests

Plusieurs environnements tests ont été créés afin de mieux évaluer le PFA (plan de feux adaptatif) par rapport au PFS (plan de feux statique). Ceux-ci sont résumés à l'aide du tableau 5.2 ci-dessous et seront expliqués dans la section 5.5.

Tableau 5.2 Description détaillée des tests

Conditions stables

Test	Description	Intensité du trafic	Caractéristiques
A	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 3	Basse	Homogène
B	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 2	Moyenne	Homogène
C	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 1	Élevée	Homogène
D	Carrefour 10 - flux 1, 2, 3 et 4 catégorie 1, flux 5,6 et 7 catégorie 2, le reste catégorie 3	Moyenne	Hétérogène
E	Carrefour 10 - flux 1 et 2 catégorie 0, flux 3 et 4 catégorie 1, flux 5, 6 et 7 catégorie 2, le reste catégorie 3	Élevée	Hétérogène
F	Carrefour 10 - flux 1, 2, 3 et 4 catégorie 0, flux 5, 6 et 7 catégorie 1, le reste catégorie 2	Élevée	Hétérogène
G	Carrefour 12 - tous les flux catégorie 3	Basse	Homogène
H	Carrefour 12 - flux 1, 2, 3, 4, 5, 6 catégorie 1, le reste catégorie 3	Moyenne	Hétérogène
I	Carrefour 12 - flux 3, 4, 5 et 6 catégorie 2, flux 1, 2, 7, 8, 9 et 10 catégorie 3, flux 11 et 12 catégorie 4	Moyenne	Hétérogène
J	Carrefour 12 - flux 1, 2, 3, 4, 5 et 6 catégorie 0, flux 7, 8, 9 et 10 catégorie 1, flux 11 et 12 catégorie 2	Élevée	Hétérogène
K	Carrefour 8 - tous les flux catégorie 3	Basse	Homogène
L	Carrefour 8 - flux 1, 2 catégorie 2, le reste catégorie 3	Moyenne	Hétérogène
M	Carrefour 8 - 1, 2 catégorie 1, flux 3,4 catégorie 2, le reste catégorie 3	Moyenne	Hétérogène
N	Carrefour 8 - flux 1, 2, 3 et 4 catégorie 0, le reste catégorie 1	Élevée	Hétérogène

Conditions avec « choc »

Test	Description	Intensité du trafic	Caractéristiques
O	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 3 pendant 10 minutes. Pendant les 30 minutes suivantes, flux 1, 3, 5, 7 et 9 catégorie 0 et le reste catégorie 3 et ensuite tous les flux catégorie 3 pendant 50 minutes	Élevée	Hétérogène
P	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 3 pendant 10 minutes. Pendant les 15 minutes suivantes, flux 1 catégorie 1 et le reste catégorie 3 et ensuite tous les flux catégorie 3 pendant 35 minutes	Élevée	Hétérogène
Q	Carrefour 10 - tous les flux catégorie 3 pendant 10 minutes. Pendant les 15 minutes suivantes, flux 1 catégorie 0 et le reste catégorie 3 et ensuite tous les flux catégorie 3 pendant 35 minutes	Élevée	Hétérogène

5.3.5 Caractéristiques de la méthode de PFA

Les détecteurs permettent de connaître la vitesse et le temps d'entrée des véhicules et ils sont situés en amont du carrefour. Dans notre cas, les paramètres de l'optimisation sont les suivants : la fenêtre de l'horizon d'optimisation est de 60 secondes, le tic est de 10 secondes et la durée de planification varie d'une heure à une heure trente selon le test.

5.3.6 Spécifications supplémentaires

Le programme informatique a été codé en C++ et les tests ont été faits sur un PC équipé d'un CPU AMD Opteron(tm) cadencé à 2.4 GHz.

5.4 Détermination du plan de feux statique de référence

Afin de pouvoir analyser adéquatement les résultats, nous avons comparé notre modèle à différents plans de feux statiques. Pour construire des plans statiques d'assez bonne qualité, nous avons utilisé l'approche suivante : pour chaque condition de circulation, nous avons appliqué au plan de feux initial de notre PFA la méthode de recherche locale basée sur le voisinage de changement de temps de phase. Chacune des solutions de cette recherche locale est évaluée sur la base d'une simulation de 10 minutes et la méthode renvoie le meilleur plan de feux statique obtenu selon ce critère. Cette solution n'est clairement pas le plan de feux statique optimal (ce n'est qu'un optimum local du voisinage utilisé par la recherche locale, soit le changement de temps de phase), mais il constitue néanmoins un plan de feux statique non trivial d'assez bonne qualité qui nous permettra d'évaluer l'intérêt de la méthode de plan de feux adaptative présentée dans ce mémoire.

Une simulation d'une heure a été faite sur plusieurs variantes de plan de feux statique. Celle avec la meilleure solution a été retenue comme étant le plan de feux statique utilisé à titre de point de comparaison avec notre PFA. Le tableau 5.3 présente plusieurs de ces PFS pour les conditions de circulation D et le tableau 5.4 représente leurs résultats après une heure de simulation. Ces résultats démontrent que pour la plupart des PFS, certains véhicules ne peuvent pas rentrer dans le carrefour puisque certaines approches se retrouvent saturées à un moment donné durant la simulation. Ces véhicules ne sont alors pas pris en considération dans la simulation ce qui crée une inexactitude au niveau des résultats. Afin de contrer ce problème, nous avons ajusté la fonction objectif pour tenir compte autant que possible ces véhicules : les véhicules détournés ont été rajoutés à la fonction objectif en leur affectant un temps égal au temps d'attente maximal remarqué sur le flux

en question. Cette modification permet aussi de faire une meilleure comparaison entre nos différents plans de feux. La valeur de la fonction ajustée devient alors :

$$\frac{\text{fonction objectif} + (\text{temps d'attente maximum} \times \text{nombre de véhicules détournés})}{\text{fonction objectif ajustée}}$$

Le test 5 étant celui nous donnant le meilleur résultat au niveau de la fonction objectif ajustée, il a été celui utilisé pour faire les comparaisons avec notre plan de feux adaptatif. La fonction objectif ajustée est très différente de la fonction objectif pour certains plans de feux puisque certains flux, comme par exemple, les flux 9 et 10 dans le test 1, n'ont que 10 secondes de temps vert, ce qui augmente le temps d'attente des véhicules sur ces flux. Comme on peut le constater dans cet exemple, il est très important de tenir compte des véhicules qui n'ont pas pu rentrer dans le carrefour.

Tableau 5.3 : 5 plans de feux statique

Flux	PFS 1				PFS 2						PFS 3					
	1	1	3	9	1	1	4	10	3	9	1	1	3	9	10	4
	2	2	4	10	2	2	6	6	5	5	2	2	5	5	6	6
	5	5	7	7	5	5	7	7	7	7	5	5	7	7	7	7
	6	6	8	8	6	6	8	8	8	8	6	6	8	8	8	8
Durée	10	20	30	10	10	10	20	10	10	10	10	10	20	10	10	10
Temps	10	30	60	70	10	20	40	50	60	70	10	20	40	50	60	70

Flux	PFS 4					PFS 5			
	1	1	4	3	9	1	1	3	9
	2	2	6	5	10	2	2	4	10
	5	5	7	7	7	5	5	7	7
	6	6	8	8	8	6	6	8	8
Durée	10	10	20	20	10	10	20	20	20
Temps	10	20	40	60	70	10	30	50	70

Tableau 5.4 Résultats après une simulation d'une heure

Tests	Plan de feu statique				
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Temps total de séjour ajusté
PFS 1	5 089	5 263	201 923	526	630 639
PFS 2	4 594	4 775	206 239	1 014	1 033 427
PFS 3	4 570	4 763	206 503	1 026	1 044 203
PFS 4	5 108	5 269	213 686	520	637 513
PFS 5	5 667	5 789	216 074	0	216 074

5.5 Expérimentation numérique

Cette section nous permet d'analyser et de comparer les résultats obtenus par notre modèle afin d'évaluer la performance de la méthode de PFA proposée. Cette section est divisée en plusieurs sous-sections où chacune correspond à un test différent.

5.5.1 Influence du type de carrefour et des conditions de trafic

Trois séries de tests ont été faites aux fins d'analyse. La première série, les tests A, B, C, D, E et F, est faite sur le carrefour 1 qui comporte 10 flux. La deuxième série, les tests G, H, I et J, est faite sur le carrefour 2 qui comporte 12 flux et la troisième série, les tests K, L, M et N, est faite

sur le carrefour 3 qui comporte 8 flux. Ces tests simulent le comportement des véhicules pendant une durée d'une heure. Ils permettent de vérifier l'adaptivité de notre modèle pour des conditions différentes de circulation par rapport au plan de feux statique au fur et à mesure qu'augmente l'intensité du trafic. Les tests A, B, C, G et K présentent des conditions de circulation homogènes stable pour tous les flux dans le carrefour alors que tous les autres tests présentés dans le tableau 5.5 représentent toujours des conditions de circulation stable mais hétérogènes à travers tout le carrefour. Ceci veut dire que le degré de saturation ne sera pas le même pour tous les flux.

Tableau 5.5 : Résultats obtenus pour les 3 carrefours

Tests	Plan de feu statique				Modèle adaptatif			
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés
A	3 810	3 906	133 234	0	3 829	3 906	96 802	0
B	5 314	5 437	246 447	29	5 381	5 466	160 133	0
C	6 958	7 143	356 339	423	7 413	7 566	262 966	0
D	5 667	5 789	216 074	0	5 688	5 789	168 438	0
E	6 611	6 730	275 107	11	6 619	6 741	200 079	0
F	7 733	7 917	313 841	647	8 403	8 544	293 433	20

Tests	Plan de feu statique				Modèle adaptatif			
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés
G	4 540	4 662	160 626	0	4 571	4 662	116 837	0
H	6 731	6 681	254 780	0	6 745	6 881	203 086	0
I	4 758	4 875	174 958	0	4 789	4 875	117 385	0
J	10 165	10 457	407 758	802	10 969	11 200	432 182	59

Tests	Plan de feu statique				Modèle adaptatif			
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés
K	3 055	3 126	89 369	0	3 062	3 126	59 899	0
L	3 313	3 382	96 613	0	3 319	3 382	67 565	0
M	4 197	4 281	128 591	0	4 215	4 281	90 222	0
N	7 646	7 784	262 584	0	7 651	7 784	190 764	0

Les résultats obtenus pour le temps total de séjour des usagers, le nombre de véhicules sortis du carrefour ainsi que le nombre de véhicules détournés, sont meilleurs pour le PFA que pour le PFS. Dans la première série de tests, plus précisément pour le test E, le temps de séjour total est de 200 079 secondes pour le PFA et de 275 107 secondes pour le PFS, résultat qui ne comprend pas les 11 véhicules détournés. L'ajustement de la fonction objectif permet de voir que l'écart devient encore plus grand entre les deux plans de feux. Le temps de séjour ajusté du PFS est de 276 511.

Tableau 5.6 Détail du test E

Test	Flux	Plan de feu statique											
		Temps d'attente (secondes)										Écart type	Moyenne
		0 à 15	15 à 30	30 à 45	45 à 60	60 à 90	90 à 120	120 à 180	180 à 240	> 240	Total > 90		
E	1	289	302	272	0	0	0	0	0	0	0	11,65	22,14
	2	318	289	321	3	0	0	0	0	0	0	12,17	22,30
	3	78	114	204	188	261	61	0	0	0	61	24,55	50,70
	4	181	189	238	74	0	0	0	0	0	0	14,36	26,95
	5	113	157	86	3	0	0	0	0	0	0	10,97	21,25
	6	91	125	72	0	0	0	0	0	0	0	10,42	20,92
	7	128	177	18	0	0	0	0	0	0	0	9,26	17,48
	8	102	122	1	0	0	0	0	0	0	0	8,18	16,19
	9	71	97	98	15	1	0	0	0	0	0	13,25	25,26
	10	67	98	81	24	1	0	0	0	0	0	13,69	25,31
Total		1438	1670	1391	307	263	61	0	0	0	61	18,67	27,51

Test	Flux	Modèle adaptatif											
		Temps d'attente (secondes)										Écart type	Moyenne
		0 à 15	15 à 30	30 à 45	45 à 60	60 à 90	90 à 120	120 à 180	180 à 240	> 240	Total > 90		
E	1	474	229	33	0	0	0	0	0	0	0	8,61	12,78
	2	538	251	62	3	0	0	0	0	0	0	9,82	13,45
	3	390	248	132	17	0	0	0	0	0	0	12,66	17,23
	4	284	212	95	4	0	0	0	0	0	0	11,72	17,14
	5	213	51	0	0	0	0	0	0	0	0	6,78	8,85
	6	207	54	8	0	0	0	0	0	0	0	7,68	10,21
	7	218	15	0	0	0	0	0	0	0	0	4,16	5,45
	8	144	12	0	0	0	0	0	0	0	0	5,18	6,09
	9	94	96	78	34	20	0	0	0	0	0	18,80	26,96
	10	89	77	76	36	8	0	0	0	0	0	17,10	26,32
	Total	2651	1245	484	94	28	0	0	0	0	0	12,68	15,14

La distribution du temps d'attente des véhicules du test E est présentée dans le tableau 5.6. On peut remarquer qu'elle est beaucoup plus étendue pour le PFS ce qui est dû en partie à la contrainte du temps maximal du temps d'attente qui est implantée avec le PFA. Une très forte concentration, près de 60 % (58,88 %) des usagers attendent moins de 15 secondes pour le PFA comparativement à seulement 28,03 % avec le PFS. 86,53 % des usagers attendent moins de 30 secondes pour le PFA et 60,58 % pour le PFS. Clairement, l'adaptivité de la méthode permet d'améliorer la fluidité de la circulation et réduit les temps d'attente pour les flux prioritaires. À l'autre extrême, avec le PFS, 1,19 % des véhicules ont un temps d'attente plus élevé que 90 secondes, et ceux-ci viennent tous du flux 3 alors que le PFA n'a aucun véhicule qui doit attendre plus que 90 secondes et seulement 0,62 % de ceux-ci ont besoin d'attendre plus que 45 secondes. Il est extrêmement difficile d'ajuster les plans de feux statiques puisqu'il faudrait faire des ajustements plus fins qui ne conviendraient pas dans toutes les situations de circulation.

Le degré de saturation des tests augmente au fur et à mesure que nous passons du test A au test B et puis au test C. Pour ces tests, à chaque fois que l'intensité augmente, le PFA donne de meilleurs résultats puisqu'il est capable de s'adapter aux changements de la circulation. Le tableau 5.7 ci-dessous démontre le pourcentage d'amélioration de la fonction objectif ajustée du PFA par rapport à la fonction objectif ajustée du PFS. On peut alors déduire l'économie de temps de la fonction objectif ajustée d'un plan de feux par rapport à l'autre. L'économie du test A est de 27,34 %, et augmente à 36,80 et 42,82 % pour les tests B et C respectivement. Par contre, le PFS a une fonction objectif et un nombre de véhicules détournés de plus en plus élevés. Pour le PFA, le seul test qui empêche de faire rentrer des véhicules dans son système est le test F.

Tableau 5.7 : Tableau comparatif du PFA et du PFS avec la fonction objectif ajustée

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
A	72,66%	27,34%
B	63,20%	36,80%
C	57,18%	42,82%
D	77,95%	22,05%
E	72,36%	27,64%
F	35,07%	64,93%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
G	72,74%	27,26%
H	79,71%	20,29%
I	67,09%	32,91%
J	41,31%	58,69%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
K	67,02%	32,98%
L	69,93%	30,07%
M	70,16%	29,84%
N	72,65%	27,35%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
O	55,15%	44,85%

Pour fins d'analyse, il est également intéressant de regrouper les tests qui se ressemblent du point de vue conditions de trafic mais qui diffèrent quant au type de carrefour étudié. Le test A est facilement comparable aux tests G et K puisqu'il alloue un degré de saturation de catégorie 3 dans des conditions de circulation homogènes. Les tests suivants sont aussi comparables : la série de tests D, H et L, la série de tests E, I et M et finalement la série de tests F, J et N.

Tableau 5.8 Regroupement des tests comparables

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
A	72,66%	27,34%
G	72,74%	27,26%
K	67,02%	32,98%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
D	77,95%	22,05%
H	79,71%	20,29%
L	69,93%	30,07%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
E	72,36%	27,64%
I	67,09%	32,91%
M	70,16%	29,84%

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
F	35,07%	64,93%
J	41,31%	58,69%
N	72,65%	27,35%

L'économie de temps est semblable pour les 3 premières séries de tests, économie entre 20 et 30 % et le type d'intersection ne semble pas avoir beaucoup d'impact. Au fur et à mesure que le degré de saturation augmente, le PFA permet une économie de temps plus considérable. Pour les tests F, J et N, les conditions de circulation présentent un degré de saturation beaucoup plus élevé que les tests précédents. Le pourcentage d'économie de temps du test F et J sont comparables. Ces tests permettent de démontrer l'importance de l'adaptivité dans des conditions de sursaturation. Ils permettent de mieux gérer les véhicules qui rentrent dans le carrefour. Pour ce qui est du test N, l'économie de temps est moins élevée puisque le carrefour ne comporte pas beaucoup de flux ce qui implique que chaque flux a un temps de vert plus élevé. Ce carrefour n'a que des flux qui vont soit tout droit ou qui tournent à droite, ce sont des flux qui sont moins problématiques au niveau de la compatibilité, ce qui assure donc une meilleure flexibilité. Toutes ces raisons expliquent aussi pourquoi nous n'avons pas réussi à saturer l'intersection.

5.5.2 Impact d'un changement brusque des conditions de trafic

5.5.2.1 Changement sur un seul flux

Notre prochaine série de tests simule la saturation du flux 1 pendant 15 minutes pour le carrefour 1. La simulation a une durée d'une heure : le premier 10 minutes a un degré de saturation de catégorie 3, pour les 15 minutes suivantes, le degré de saturation est à catégorie 1 et il est remis à catégorie 3 pour les 35 minutes suivantes. Cette simulation est représentée à l'aide de la figure ci-dessous. Cette même simulation est ensuite répétée en changeant les flux de catégorie 1 à catégorie 0. Elles sont illustrées à l'aide de la figure 5.2 et 5.3. La variation de la répartition du temps de vert est plus importante lorsque le flux devient de plus en plus saturé. Il est important de remarquer qu'aucun véhicule n'a été détourné pour les deux simulations.

Les deux figures illustrent le changement du niveau de saturation ainsi que le nombre de véhicules présents à une itération donnée. Chacun d'eux suit une tendance en ce qui a trait à la répartition du pourcentage du temps de vert pour le flux en question. Cette tendance a été tracée visuellement sur les deux figures afin de mieux interpréter les résultats. Elle peut facilement être représentée en 5 phases. La première phase représente la situation initiale, qui est en fait la situation « stable » du système, le mode d'opération normal. La deuxième phase est la phase de réaction au changement de degré de saturation. Donc la répartition du temps de vert est ajustée de façon à permettre aux véhicules du flux 1 de sortir le plus rapidement possible pour laisser rentrer les véhicules. La phase 3 est la nouvelle situation « stable ». En fait, le système a tout simplement trouvé un nouveau niveau stationnaire. La phase 4 permet au système de se réajuster suite à la diminution du degré de saturation

du flux 1 et la phase 5 est le retour à la situation « stable » de la phase 1. On peut remarquer que la tendance de la répartition du pourcentage du temps de vert à la phase 5 et à la phase 1 sont similaires.

Figure 5.2 15 minutes de saturation de catégorie 1

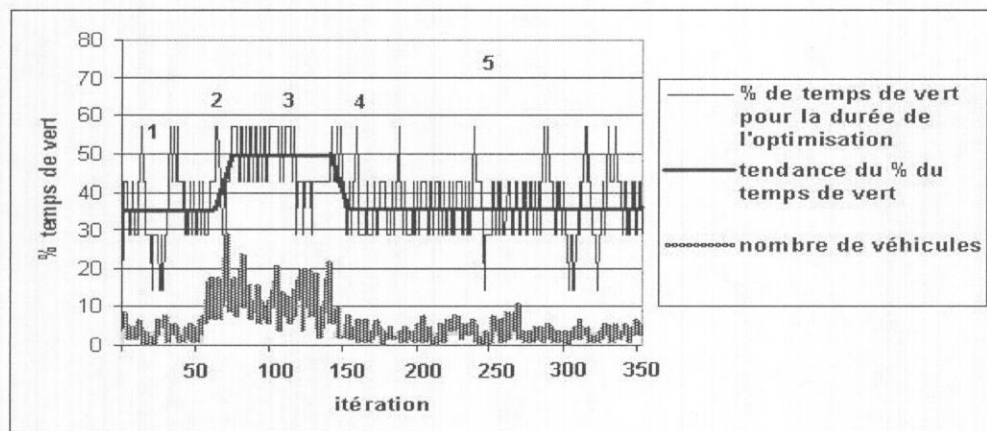
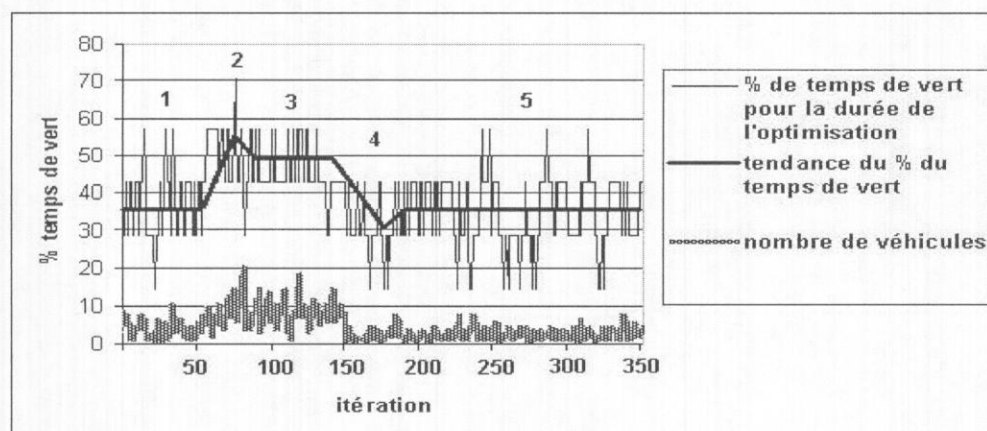


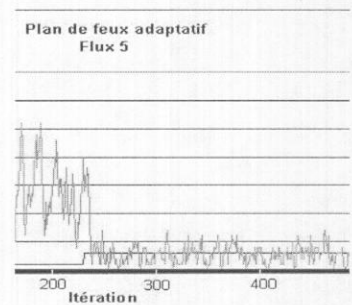
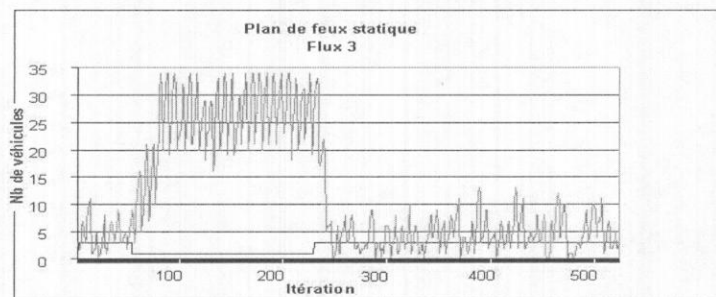
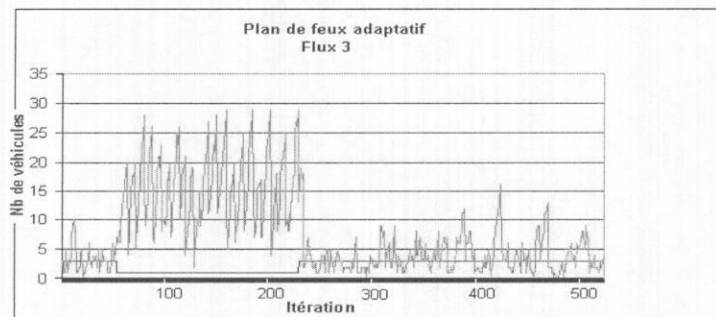
Figure 5.3 15 minutes de saturation de catégorie 0

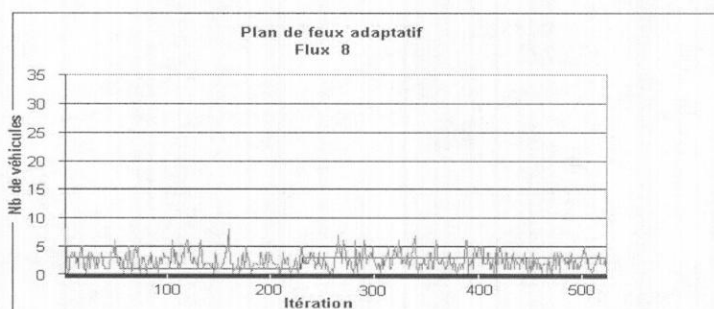
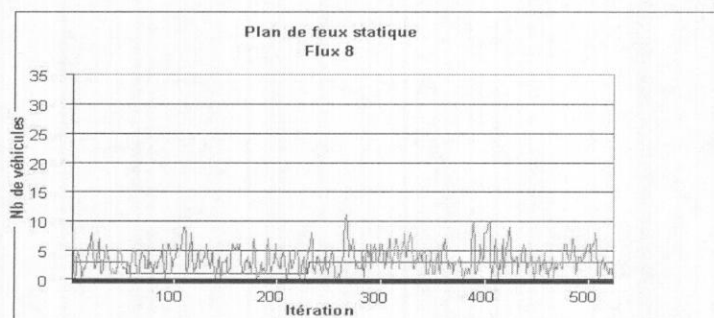
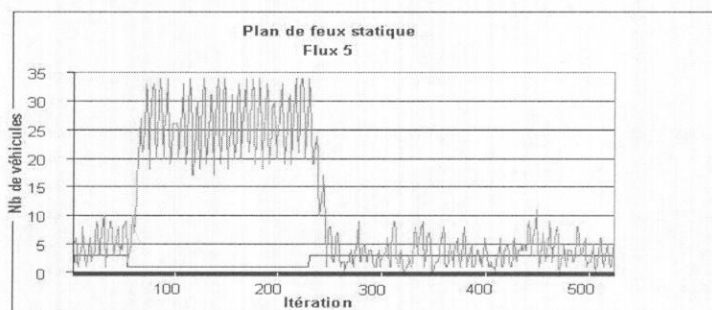


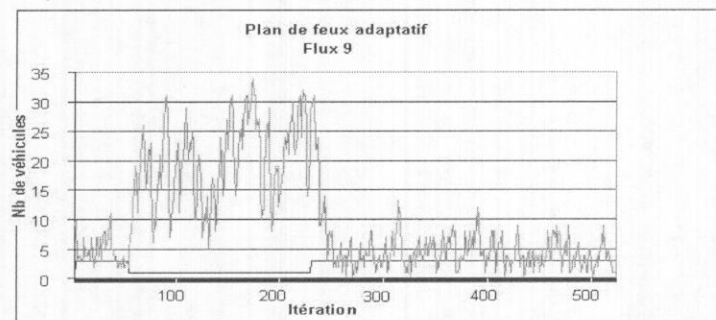
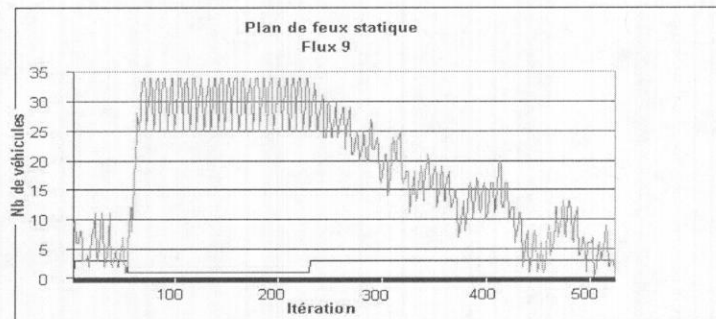
5.5.2.2 Changement sur plusieurs approches – « Test Centre Bell »

Des tests ont été faits afin de simuler une situation de congestion sur plusieurs flux d'un carrefour. Cette simulation a été utilisée afin de recréer la sortie d'un évènement sportif d'un stade sportif. Les flux impairs sont les seuls affectés par ce changement au niveau de leur degré de saturation : catégorie 3 pendant 10 minutes, les 30 minutes suivantes à catégorie 0 et le dernier 50 minutes à catégorie 3. Pour ce qui est des flux pairs, leur degré de saturation est à catégorie 3 pendant toute la durée de simulation qui est d'une heure et demie.

Figure 5.4 Flux utilisant le plan de feux adaptatif et le plan de feux statique pour le « Test du Centre Bell »







Les figures ci-dessus illustrent très bien le changement de saturation des différents flux. Le système adaptatif est capable de gérer l'augmentation du nombre de véhicule sur les flux impairs et leur permet de retrouver leur état normal rapidement ce qui n'est pas le cas pour le PFS. L'exemple le plus marquant est pour le flux 9. Le PFS ne retrouve son état normal qu'après 400 itérations alors que le PFA se rétablit vers la 250^{ième} itération. L'adaptivité du PFA permet d'avoir, en moyenne, un nombre de véhicules moins élevé sur les différents flux. Pour ce qui est des flux pairs, ils sont affectés indirectement et de façon très minime comme on peut le voir sur les graphiques du flux 8.

Les résultats du temps total de séjour des véhicules sont plus performants pour le PFA que pour le PFS. On note une amélioration de la fonction objectif de 56,86 %, qui se traduit par une économie de temps de 43,14 %, ce qui est non négligeable. Comme on peut le voir dans le tableau 5.9, 35 véhicules ont été détournés dans le cas du PFA comparativement à 553 pour le PFS. Pour ce qui est du PFS, les flux 3, 5 et 7 sont les flux qui sont les plus marqués par le changement du degré de saturation.

Tableau 5.9 Résultats pour le « test du Centre Bell »

Tests	Plan de feu statique				Modèle adaptatif			
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés
O	7 562	7 659	367 570	553	8 099	8 177	267 283	35

Tableau 5.10 Performance du « test du Centre Bell »

Tests	Objectif PFA/ Objectif PFS	Économie de temps
O	56,86%	43,14%

5.5.3 Sensibilité aux variations du paramètre de temps d'attente maximum

Plusieurs tests ont été faits afin de vérifier l'impact de la contrainte sur le PFA. La première modification consistait à faire des changements au niveau du paramètre du temps maximal. La donnée initiale était de 90 secondes. Nous avons modifié cette valeur à 60 secondes et puis ensuite à 120 secondes. La contrainte a ensuite été enlevée pour mieux évaluer son impact. Nous avons effectués 10 simulations différentes

pour chaque changement de paramètre et les résultats sont illustrés dans le tableau 5.11 ci-dessous. Toutes ces simulations ont été faites sur le test J (carrefour à 12 flux).

Tableau 5.11 Moyenne des résultats des différentes instances des tests en modifiant le temps maximal de la contrainte ou en éliminant la contrainte

Tests	Modèle adaptatif					
	Nb de véhicules sortis	Nb de véhicules entrés	Temps total de séjour	Nb de véhicules détournés	Temps total de séjour ajusté	Temps d'attente moyen
60 sec	9 606	9 924	395 178	1 442	1 154 412	53.84
90 sec	10 081	10 390	439 472	977	1 034 871	44.43
120 sec	10 588	10 874	457 377	493	731 374	33.31
Sans contrainte	10 470	10 721	339 368	646	1 539 836	37.10

En relaxant la contrainte, le nombre de véhicules pouvant rentrer ainsi que le nombre de véhicules pouvant sortir du carrefour augmente. Le temps de séjour des véhicules est comparable dans l'ensemble mais lorsque celui-ci est ajusté, on remarque que lorsque la contrainte est fixée à 120 secondes, le temps de séjour est nettement amélioré. L'économie de temps du test à 120 secondes est de 29,3 % par rapport au test à 90 secondes et de 36,7 % pour le test de 60 secondes.

Le modèle adaptatif avec contrainte a deux objectifs : un objectif individuel, le temps d'attente et un objectif global, le temps total de séjour. Lorsque le temps maximal de la contrainte est de 60 secondes, l'objectif individuel prend plus d'importance. Ceci entraîne un délai de temps de vert potentiellement trop court puisque le feu de circulation change plus rapidement. Le nombre de véhicules détourné augmente puisque les flux refoulent plus rapidement. Les véhicules dans ces flux accélèrent et décélèrent plus fréquemment ce qui est moins efficace.

Lorsque le temps maximal est de 120 secondes, le nombre de véhicules détourné diminue puisque les phases sont potentiellement plus longues. Dans ce cas, l'objectif global prend plus d'importance.

Le dernier scénario, le modèle adaptatif sans contrainte, ne tient compte que de l'objectif global. C'est pour cette raison qu'il a le meilleur résultat au niveau de la fonction objectif. Cette solution n'est pas très avantageuse pour les usagers. Ce scénario ne reconnaît pas la différence entre : un véhicule à l'arrêt sur un flux saturé et un véhicule à l'arrêt sur un flux non saturé. Ces deux véhicules auront une valeur équivalente au niveau de la fonction objectif.

Le temps d'attente moyen diminue en relaxant la contrainte puisqu'il ne tient compte que des véhicules qui ont été capable d'entrer dans le carrefour. L'objectif global, le temps de séjour doit être minimisé. Ceci implique que le temps d'attente moyen des véhicules sera minimisé dans son ensemble et non individuellement.

5.5.4 Analyse de l'impact respectif des différents voisinages du VND

Afin de bien comprendre l'impact des différents voisinages du VND, nous avons, pour le test A, déterminé le nombre de fois que les différents types de voisinages ont généré une solution admissible ainsi que le nombre de fois que cette solution a été conservée.

Le tableau 5.12 indique clairement que le voisinage le moins souvent visité est l'élimination d'une phase. Il est cependant celui utilisé le plus souvent, soit 55,86 % du temps. Ce voisinage diminue la flexibilité du plan de feux. Le voisinage de changement de temps de phases est le deuxième voisinage le plus utilisé puisqu'il est notre méthode de descente. Pour ce qui est des deux autres voisinages : le changement

de flux change la solution dans 8,74 % des cas et le changement de phase dans 2,84 % des cas. Le voisinage de changement de phase ne doit respecter aucune contrainte ce qui rend toutes les solutions générées par celui-ci réalisables contrairement aux autres voisinages.

Tableau 5.12 Statistique des différents voisinages utilisés

Voisinage	Nb de meilleures solutions trouvées	Nb de solutions réalisables	%
Changement de durée	2 503	12 174	20.56%
Changement de flux	415	4 749	8.74%
Changement de phase	297	10 465	2.84%
Élimination d'une phase	224	401	55.86%

Chapitre 6 - Conclusion

L'objectif de ce mémoire était de mettre au point une méthode permettant de gérer en temps réel le plan de feux d'une intersection dans un contexte de STI afin de minimiser la somme du temps de séjour des véhicules de tous les flux du carrefour pour un horizon de planification déterminé. Pour ce faire, nous avons développé une méthode d'optimisation adaptative du contrôle des feux à une intersection en utilisant les informations en temps réel fournies par un STI. Nous avons donc étendu un modèle flexible qui permet l'élimination des cycles et la modification du concept de phase. Nous avons présenté plusieurs variantes de la méthode de recherche à voisinage variable afin de résoudre le problème. Un autre des défis associé à la résolution de ce problème a été de créer un simulateur nous permettant de modéliser le comportement des véhicules et qui soit un reflet adéquat de la réalité.

Après avoir testé et analysé les résultats, nous en sommes venus à la conclusion que nous avons une méthode très efficace. Nous avons été capable de démontrer que notre modèle permet une économie de temps jusqu'à 42,82 % par rapport au plan de feu statique dans des conditions de trafic pour un carrefour avec 10 flux avec une intensité de trafic élevée et des caractéristiques homogènes. Notre test de performance du « Centre Bell » nous a permis de faire une économie de temps de 43,14 % par rapport au plan de feu statique. Ces résultats ont aussi été capable de démontrer que notre modèle nous permet de trouver de meilleurs plans de feux que le plan de feux statique autant

pour la fonction objectif que pour tous les autres indicateurs de performance. Notre modèle a été capable, à une exception près, d'atteindre notre deuxième objectif qui est le temps d'attente total maximum des usagers.

Plusieurs avenues sont envisageables pour poursuivre les recherches entamées dans ce mémoire. Le simulateur et l'outil pourraient être modifiés afin de tenir compte : des incidents sur un ou plusieurs flux du carrefour, des autobus et des camions et le changement de voies des véhicules. Les véhicules pourraient avoir la possibilité d'aller tout droit, de tourner à gauche ou à droite sur un même flux. Il serait également intéressant de tester l'outil sur un plus grand éventail de carrefours et de conditions de circulation. Ceci nous permettrait d'observer la réaction de notre modèle vis-à-vis une plus grande variété de situations. D'autres variantes de la méthode de recherche à voisinage variable pourraient aussi être testées dans l'amélioration du plan de feux.

Bibliographie

- [1] Barrière, J.F., Farges, J.L., Henry, J.J., « Decentralization vs Hierarchy in Optimal Traffic Control », *5th International Federation of Automatic Control, International Federation of Information Processing, International Federation of Operational Research Societies International Conference on Control in Transportation Systems*, 1986, pp. 321-326.
- [2] Baass Karsten, *Dynamique de la Circulation CIV6706*, 2002
- [3] Boillot, F., Blosseville, J.B., Lesort, J.B., Motyka, V., Papageorgiou, M., Sellam, S., « Optimal Signal Control of Urban Traffic Networks », *Sixth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control*, Institute of Electrical Engineers London, April 1992, N° 355, pp. 75-79.
- [4] Bowen, G.T., Bretherton, R.D., « Latest Developments in SCOOT – version 3.1 », *Road Traffic Monitoring and Control*, April 23-25, 1996, Conference Publication N° 422, Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 61-65.
- [5] Box, M.J., « A New Method of Constrained Optimization and a Comparison with Other Methods », *Computer Journal*, 8, 1965, pp. 42-52.

[6] Braban, C., Boillot, F., « Les systèmes temps réel de commande de feux en milieu urbain », *Synthèse de l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité n° 44*, Avril 2003.

[7] Bretherton, R.D., « SCOOT: Current developments », *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport System*, Yokohama, Japan, November 9-11 1995, Volume 1, pp. 364-368.

[8] Farges, J.L., Kamdem, I., Lesort, J.B., « Realization and Tests of a Prototype for Real Time Urban Traffic Control », *Proceedings of the DRIVE Conference*, Volume 1, Brussels, 1991, pp. 527-542.

[9] Gazis, D. C., *Traffic Science*, John Wiley & Sons, 1974, pp. 184-190.

[10] Gartner, N. H., « OPAC: Strategy for Demand Responsive Decentralized Traffic Signal Control », *Control, Computers, Communication*, 1990, pp. 241-244.

[11] Hansen, P., Mladenović, N., « An Introduction to Variable Neighborhood Search », dans *Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization* S. Voss, S. Martello, I. Osman et C. Roucairol éditeurs., Kluwer, 1999, pp. 433-458.

[12] Henry, J.J., Farges, J.L., « PRODYN », *Control, Computers, Communications in Transportation*, 6th International Federation of Automatic Control Symposia series, 1990, N° 12, pp. 253-255.

[13] Hunt, P.B., Roberston, D.I., Bretherton, R.D., Winton, R.D., « SCOOT, A Traffic Responsive Method of Co-Ordinating Signals », *Transport and Road Research Laboratory, Laboratory Report 1014*, 1981.

[14] Hunt, P.B., Roberston, D.I., Bretherton, R.D. « The SCOOT on-line Traffic Signal Optimisation Technique », *Traffic Engineering & Control*, April 1982, pp. 190-192.

[15] Kuester, J.L., *Optimization Techniques with Fortran*, McGraw-Hill, New York, 1973, pp. 368-385.

[16] Luk, J.Y.K., « Two Traffic Responsive Area Traffic Control Methods: SCATS and SCOOT », *Traffic Engineering and Control*, 1984, pp. 14-22.

[17] McShane, W.R., *Traffic Engineering*, Prentice Hall, 1998

[18] Martin, P.T., Hockaday, S.L., « SCOOT – An Update », *Institute of Transportation Engineers Journal*, January 1995, pp. 44-48.

[19] Morgan, J.T., Little, J.D.C., « Synchronizing Traffic Signals for Maximal Bandwidth », *Operations Research* 12, 1964, pp. 896-912.

[20] Orselli, J., « SCATS: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System », *Traffic Engineering and Control*, N° 129, Mars-Avril 1995, pp. 3-7.

[21] Orselli, J., « SCATS: Sydney Coordinated Adaptive Traffic System », *Traffic Engineering and Control*, N° 132, Septembre-Octobre 1995, pp. 3-7.

[22] Robertson, D.I., « TRANSYT: Method of Area Traffic Control », *Traffic Engineering and Control*, October 1969, pp. 276-283.

[23] Robertson, D.I., Bretherton, R.D., « Optimising Networks of Traffic Signals in Real-Time: The SCOOT method. », *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40 n° 1, February 1991, pp. 11-15.

[24] Robertson, D.I., Hunt, P.B., « A Method of Estimating the Benefits of Co-ordinating Signals by TRANSYT and SCOOT », *Traffic Engineering & Control*, November 1982, pp. 527-531.

[25] Vincent, R. A., Young, C.P., « Self-Optimising Traffic Signal Control Using Microprocessors, The TRRL MOVA strategy for Isolated Intersections », *Traffic Engineering and Control*, July/August 1986, pp. 385-387.

[26] Wieck, M., « MOTION: A New Solution for Real-time Adaptive Control », *Third World Congress on Intelligent Transportation Systems*, Orlando, Florida, 1996, pp. 262-263.