

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Faculté des Sciences Exactes
Département de Recherche Opérationnelle



Mémoire de fin de d'études

En vue de l'obtention du diplôme du Master en Mathématiques Appliquées

Spécialité : Modélisation Mathématique et Techniques de Décision

Thème

APPLICATION DE LA THÉORIE DES JEUX POUR LA RÉGULATION DES FEUX DE SIGNALISATION DE L'INTERSECTION DU RAMEAU D'OLIVIER BÉJAÏA

Présenté par :

M^{elle}.BEDJOU THILLELI
M^r.RAMOUL ALI

Devant le jury composé de :

Présidente	Mme TOUCHE, Née ANZI Aicha	MCB	Université de Béjaïa
Rapporteurs	Mr MAHIOUT Hichem	Doctorant	Université de Béjaïa
	Mr RADJEF Mohammed Said	Professeur	Université de Béjaïa
Examinatrice	Mme KARA, Née KENDI Salima	MAA	Université de Béjaïa

Béjaïa, octobre 2020.

Remerciements

Louange A Dieu, le miséricordieux, sans Lui rien de tout cela n'aurait pu être.

*Au terme de ce travail nous exprimons nos plus sincères remerciements à notre promoteur **Pr. Mohammed Saïd RADJEF** pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer et un grand honneur pour **Mr. Hichem MAHIOUT**. Leurs conseils précieux ont permis une bonne orientation dans la réalisation de ce modeste travail.*

Nous tenons également à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger ce travail, et d'avoir consacré leurs temps pour sa lecture.

Nous tenons à adresser nos vifs remerciements à nos enseignements pour le savoir qui nous ont transmis durant notre cursus.

Enfin nous tenons à rendre hommage à toutes nos familles et nos amis pour le soutien qu'ils nous ont apportés durant toutes ces années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui m'a donnée vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.

A mon père, école de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années d'études, Que dieu les gardes et les protège.

A ma très chère sœur (Dyhia) pour son encouragement et vœu de tous les jours.

A mon cher frère (Ighmourassen) que j'aime trop.

A tous mes amis surtout mes proches et à tous les étudiants de ma promotion de département Recherche Opérationnelle de l'université de Bejaia.

A toute ma famille.

Thilleli.Bedjou

Je dédie ce modeste travail :

A ma source de courage

A ceux que j'ai de plus cher : ma famille,

A tous mes amis.

Ali.Ramoul

Table des matières

Remerciements	2
Dédicaces	3
LISTE D'ACRONYMES	8
Introduction générale	9
1 Trafic routier	11
Introduction	11
1.1 Trafic routier	11
1.1.1 Intersection	11
1.1.2 Autoroutes	12
1.2 La congestion routière	12
1.2.1 Congestion incidente	12
1.2.2 Congestion récurrente	12
1.3 Régulation des feux de signalisation	12
1.3.1 Intersections signalisées	13
1.3.2 Fonctionnement des feux de signalisation	13
1.4 Stratégies de régulation des feux de signalisation	14
1.4.1 Stratégies prédéterminées	14
1.4.2 Stratégies adaptatives	15
Conclusion	17
2 Théorie des jeux et contrôle des feux de signalisation	18
Introduction	18
2.1 Généralités	18
2.2 Classification des jeux	19
2.2.1 Jeux à somme nulle et à somme non nulle	19
2.2.2 Jeux coopératifs et non-coopératifs	19
2.2.3 Jeu simultané	20
2.2.4 Jeu séquentiel (dynamique)	20
2.2.5 Méta jeu	20
2.3 Présentation d'un jeu sous forme normale	20
2.4 Présentation d'un jeu sous forme extensive	20
2.5 Concepts de solution	21
2.5.1 Stratégie de meilleure réponse	22
2.5.2 Équilibre de Nash	22

2.6	Application de la théorie des jeux à la régulation des feux de signalisation	23
2.6.1	Jeux non-coopératifs	23
2.6.2	Jeux coopératifs	25
	Conclusion	28
3	Modèle du jeu non-coopératif avec contraintes	29
	Introduction	29
3.1	Position du problème	29
3.2	Modélisation	32
3.3	Résolution	35
	Conclusion	38
4	Simulation et résultats	39
	Introduction	39
4.1	Système de signalisation adopté actuellement au niveau du carrefour (ROB) . .	39
4.1.1	Mouvements et fonctionnement du système de signalisation adopté au carrefour (ROB)	41
4.2	Simulation et résultats	42
4.2.1	Choix des paramètres et collecte de données	42
4.2.2	Interprétation des résultats	48
	Conclusion	53
	Conclusion générale et perspectives	54

Table des figures

1.1	Illustration d'une intersection signalisée	13
1.2	Principe de fonctionnement du système SCATS.	16
2.1	Forme extensive du jeu d'entrée sur un marché	21
2.2	Intersection à deux phases.	23
2.3	Les phases d'un cycle complet à feux de signalisation	24
2.4	Plusieurs intersections dans un environnement connecté.	27
3.1	Les mouvements du trafic au niveau de l'intersection Rameau d'olivier	30
3.2	Les phases de l'intersection Rameau d'olivier	32
4.1	Les phases du système adopté actuellement au niveau de l'intersection Rameau d'olivier	40
4.2	Photo réelle qui montre la congestion et la saturation de la zone de conflit.	40
4.3	Nombre de véhicules restant dans chaque phase du système actuel	49
4.4	Nombre moyen de véhicules restant dans toute l'intersection du système actuel	49
4.5	Nombre de véhicules restant dans chaque phase de l'intersection du système proposé	50
4.6	Nombre de véhicules restant dans l'intersection du système proposé	51
4.7	Variations des durées des feux verts de chaque phase de l'intersection	51
4.8	Nombre de véhicules restant sur chaque voie de l'intersection Rameau d'olivier	52
4.9	Nombre de véhicules restants dans l'intersection Rameau d'olivier dans les deux systèmes	53

Liste des tableaux

3.1	Ensemble de voies et mouvements de l'intersection et la nature du feu utilisé . .	31
4.1	Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 1 ^{er} jour.	43
4.2	Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 2 ^{eme} jour	44
4.3	Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 3 ^{eme} jour	45
4.4	Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 4 ^{eme} jour	46
4.5	Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 5 ^{eme} jour	47
4.6	Taux d'arrivées moyens des véhicules sur les quatre phases de l'intersection du Rameau d'olivier.	48
4.7	Taux de départ des véhicules sur les quatre phases de l'intersection du Rameau d'olivier.	48
4.8	Paramètres d'entrée du système de signalisation proposé.	48

Liste d'Acronymes

GNE : Generalized Nash Equilibrium : Équilibre de Nash Généralisé.

LGNEP : Linear Generalized Nash Equilibrium Problem : Problème d'équilibre de Nash généralisé linéaire.

LGNEPSC : Linear Generalized Nash Equilibrium Problem with Shared Constraint : Problème d'équilibre de Nash généralisé linéaire avec Contraintes.

KKT : Karush–Kuhn–Tucker .

Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, vu l'amélioration du niveau de vie moyen, on assiste à une augmentation sans précédent des besoins en déplacement au niveau de la majorité des grandes villes à travers le monde. La réponse à cette demande s'interprète principalement par la multiplication du nombre de véhicules en circulation. Ce phénomène a des effets sur les déplacements quotidiens des citoyens et a de nombreux impacts négatifs en termes de qualité de vie. Pour assurer la fluidité du trafic et pour remédier au problème de la congestion, différentes solutions ont été proposées, comme par exemple, construire des sens giratoires, installer des barrages, réaliser des sens uniques et des autoroutes... La solution la plus adoptée pour réduire la congestion est la régulation du trafic par les feux de signalisation. Plusieurs stratégies ont été développées dans la littérature pour améliorer les conditions de circulation au niveau des intersections urbaines.

La mobilité urbaine dans les grandes villes algériennes constitue une préoccupation permanente des services concernés par la régulation du trafic routier, vu l'état critique dû à la congestion qu'elles connaissent, notamment dans les centres-villes. En raison de sa position stratégique et de son potentiel touristique, la ville de Béjaïa est la deuxième ville d'Algérie en matière d'activités commerciales et économiques [Idjeraoui et al., 2019]. Cependant, le réseau routier de la ville de Béjaïa souffre de sérieux problèmes de congestion, surtout durant les périodes de pointe. Pour remédier à cette situation, les autorités locales ont entrepris plusieurs actions, afin de corriger les dysfonctionnements de la circulation. Plusieurs réponses sont apportées à ces problèmes de congestion, notamment l'utilisation du transport en commun, le développement de nouvelles infrastructures, la régulation du trafic par les feux de signalisation...etc. Actuellement, la plupart des intersections de la ville de Béjaïa sont équipées des feux tricolores pour réguler le trafic. Malgré cela, les problèmes de congestion et d'encombrement restent non résolus. Cela s'explique par le fait que les plans de feux utilisés ne s'adaptent pas aux variations et fluctuations de la demande du trafic.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à la régulation des feux de signalisation, en particulier, au niveau de l'intersection du rameau d'olivier, considérée comme une des plus congestionnées au niveau de la ville de Béjaïa. Pour cela, nous utilisons la théorie des jeux pour modéliser et résoudre le problème de congestion au niveau de cette intersection. Plus précisément, nous avons appliqué le modèle de jeu non-coopératif avec contraintes proposé dans [Mahiout et al., 2020] pour améliorer la gestion des feux de signalisation au niveau de cette intersection. Ce jeu est constitué de quatre joueurs représentant les phases de l'intersection. Chacun des joueurs cherche à augmenter sa durée de feu vert afin de minimiser le nombre de véhicules en attente sur les liens de la phase représentée. La solution de ce jeu est l'équilibre de Nash interprété comme un vecteur représentant les durées de vert de toutes les phases de l'intersection.

Les résultats obtenues après la simulation permettent de valider le modèle proposé dans le 3^{ème} chapitre. Car après comparaison du nombre de véhicules restants dans les voies selon les deux systèmes, le système proposé est meilleur dans 8 voies sur 11. Ce résultat été clairement confirmé lors de la comparaison selon le nombre moyen de véhicules restants dans toute l'intersection ce qui conclut que le système proposé est largement plus performant que le système adapté actuellement, en plus de la suppression de tout conflit et l'adaptation des durée du feu verts aux différentes demandes.

Ce travail est réparti en quatre chapitres :

Le chapitre 1 est consacré pour la présentation des notions de base de la régulation du trafic par les feux de signalisation. Ainsi d'expliquer les différentes méthodes appliquées dans ce cadre. En distinguant d'une part, les systèmes prédéterminés qui agissent directement sur la durée totale du cycle, à savoir les stratégies de Webster[Webster, 1958] et Transyt[Robertson, 1969]. D'autre part, les systèmes adaptatifs qui réagissent en temps réel sur les feux de signalisation. Ces systèmes sont classés en deux catégories ; stratégies cycliques comme SCOOT[Hunt et al., 1982] , SCATS[Lowrie, 1982]) et stratégies acycliques comme PRODYN [Henry et al., 1984], UTOPIA [Mauro and Di Taranto, 1990].

Le chapitre 2 est relatif aux notions élémentaires de la théorie des jeux. Les travaux abordant des problèmes de la régulation du trafic par la théorie des jeux sont également présentés.

Le chapitre 3 présente notre modèle de régulation au niveau de l'intersection Rameau d'olivier. Celle-ci s'inscrit dans le cadre des systèmes non-coopératifs pour la gestion des feux de signalisation en temps-réel.

Le chapitre 4 est réservé pour la simulation du modèle proposé ainsi que l'analyse des résultats en comparaison au plan de feu utilisé actuellement au rameau d'olivier.

1

Trafic routier

Introduction

Le développement économique et la croissance de la population mondiale ont augmenté le nombre de véhicules en circulation dans les réseaux routiers. Ainsi, la congestion routière est devenue un problème majeur dans la plupart des grandes villes à travers le monde. Malgré l'existence de nombreux systèmes de gestion et de régulation du trafic, nous faisons encore face à des encombrements et embouteillages, principalement aux intersections à feu. Dans ce chapitre, nous introduisons le trafic routier, ainsi que les phénomènes qui peuvent provoquer des congestions routières. Ensuite, nous présenterons d'une manière détaillée la régulation du trafic aux intersections signalisées et quelques méthodes de gestion des feux.

1.1 Trafic routier

Le trafic routier est un système assez complexe en raison, d'une part du nombre élevé de participants et, d'autre part, à cause de ses caractéristiques. Le phénomène le plus marquant dans le trafic routier est le développement considérable de la circulation automobile et l'accroissement constant de la motorisation (mécanisation).

L'augmentation du trafic routier et l'incapacité des routes à accueillir le nombre important de voitures ont rendu nécessaire l'étude du trafic routier d'une manière précise et adéquate. L'analyse du trafic permet de mettre en exergue les catégories de voies dont la différenciation est nécessaire pour le traitement et la sécurité routière, il peut être utile de les répartir en deux classes : les intersections urbaines et les autoroutes [Alexis, 2003].

1.1.1 Intersection

Une intersection peut être définie comme un point de rencontre entre deux ou plusieurs routes [Florent, 2015]. Ainsi, le croisement des routes constitue un danger permanent aux

véhicules traversant une intersection. C'est la raison pour laquelle, les véhicules sont restreints de respecter les règles de passage aux intersections.

Il existe plusieurs règles de circulation aux intersections, par exemple, les intersections avec panneau de signalisation, les intersections avec ordre de priorité et les intersections avec feux de signalisation.

1.1.2 Autoroutes

Une autoroute est un ensemble de voies permettant la circulation d'un grand nombre de véhicules ayant la possibilité de rouler à vitesses élevées. Pour des raisons de sécurité, au niveau d'une autoroute, les deux sens de circulation sont séparés par une glissière de sécurité et aucun croisement ni passage à niveau n'est autorisé.

1.2 La congestion routière

La congestion routière est définie par les experts du trafic comme une circulation en accordéon où les véhicules roulent au ralenti ou en mode arrêt-départ, elle apparaît lorsque la demande de déplacements excède la capacité de l'infrastructure. Deux types de phénomènes peuvent provoquer une congestion routière, ainsi, on parle d'une congestion incidente (ou congestion de l'offre) et une congestion récurrente (ou congestion de la demande). Dans le premier cas, l'embouteillage est provoqué par une réduction soudaine de la capacité de l'infrastructure. Dans le second cas, l'encombrement survient lorsque la demande augmente et dépasse l'offre.

1.2.1 Congestion incidente

La congestion incidente est provoquée par des événements aléatoires et particuliers, tels que des accidents de la route, des chantiers de construction, des conditions météorologiques et des intempéries. Dans de telles situations, l'écoulement du trafic est perturbé, résultant des circulations en ralenti et même dans certains cas les véhicules s'arrêtent complètement.

1.2.2 Congestion récurrente

Cette congestion se produit principalement lorsqu'un très grand nombre de véhicules utilisent le réseau routier au même temps. Par exemple, durant les périodes de pointe où la demande de véhicules est très élevée au point de dépasser la capacité des routes.

1.3 Régulation des feux de signalisation

Le flux de trafic peut être perfectionné à travers la maîtrise (contrôle) des différentes intersections du réseau routier. Cela est possible grâce à la mise en place de feux de signalisation. Plus précisément, ces feux évitent les mouvements conflictuels à l'intérieur d'une intersection, et améliorent la sécurité de passage des usagers.

Avant d'expliquer les principales méthodes de régulation utilisées dans le réglage des feux, ci-après, nous définissons les intersections signalisées, ainsi que leur mode de fonctionnement.

1.3.1 Intersections signalisées

Une intersection signalisée est définie comme un lieu de croisement entre deux ou plusieurs routes, où la gestion du trafic est réalisée par des feux de signalisation. Le choix des signaux lumineux peut être lié à des raisons diverses et variées telles que la sécurité, la fluidité, la visibilité, la gestion des véhicules prioritaires, ...etc. Généralement, une intersection est découpée en trois zones (voir la Figure 1.1) :

- a) La zone de conflit correspond au point où se croisent les véhicules traversant l'intersection.
- b) La zone de stockage est la partie où les véhicules s'arrêtent avant de pouvoir traverser l'intersection.
- c) La zone de sortie est située en aval de la zone de conflit, elle correspond aux voies par lesquelles les véhicules sont évacués.

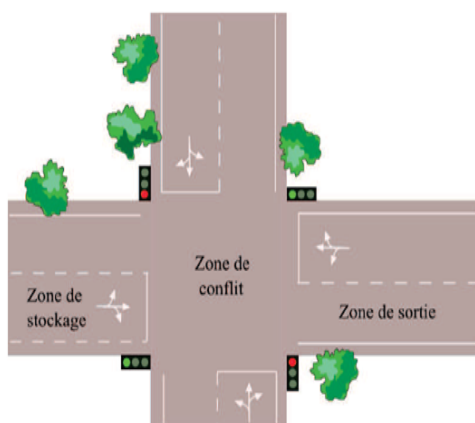


FIGURE 1.1 – Illustration d'une intersection signalisée

1.3.2 Fonctionnement des feux de signalisation

Les feux de signalisation sont utilisés pour éviter les mouvements conflictuels de l'intersection en donnant accès à la zone de conflit, à tour de rôle, aux utilisateurs qui se trouvent au niveau des zones de stockage. Pour les véhicules, ceci est représenté par trois signaux lumineux :

- Le signal vert autorise les véhicules à s'engager dans la zone de conflit.
- Le signal rouge interdit aux véhicules de s'engager dans la zone de conflit, les véhicules sont contraints de s'arrêter dans la zone de stockage.

- Le signal jaune est un feu transitoire entre le rouge et le vert. Il oblige les conducteurs étant de ralentir à l'approche de toute intersection (même quand le feu est vert) afin de pouvoir s'arrêter sans risque si ce feu change de couleur.

Les feux de signalisation sont utilisés pour éviter les mouvements conflictuels au niveau des intersections. Les systèmes de feux ont un mode de fonctionnement très simple : le temps est découpé en une succession de cycles et de phases. Un cycle est défini comme une succession de phases durant lesquelles tous les flux de véhicules entrant dans l'intersection ont été servis au moins une fois. Une phase est la durée pendant laquelle un ou plusieurs flux de véhicules sont autorisés à traverser l'intersection.

Les flux qui ont accès à la zone de conflit simultanément doivent être cohérents, c-à-d des flux de véhicules qui ne se croisent pas entre eux. À la fin d'une phase, le signal passe au jaune annonçant aux conducteurs qu'aura un changement de feu, puis au rouge pour l'arrêt immédiat. Après quelques secondes de rouge durant lesquelles aucune phase n'est active, afin de permettre l'évacuation de la zone de conflit, une autre phase commence.[Onana and Guideke, 2019]

1.4 Stratégies de régulation des feux de signalisation

Dans cette section, nous présenterons quelques méthodes de régulation des feux de signalisation qui ont été développées dans la littérature. Ces méthodes sont regroupées en deux catégories : les méthodes prédéterminées et les méthodes adaptatives.

1.4.1 Stratégies prédéterminées

Appelées aussi stratégies hors-ligne, ces méthodes agissent directement sur la durée totale du cycle en observant les augmentations et les diminutions des débits du trafic. L'objectif de ces méthodes est la détermination de la durée de cycle totale et sa répartition en durées de verts[Laurant, 2001]. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

1.4.1.1 La méthode de Wardrop [Laurant, 2001]

Cette méthode permet de calculer la durée de vert minimale permettant le passage de tous les véhicules de toutes les routes de l'intersection et cela dans le cas où les véhicules arrivent uniformément. La durée de vert minimale est donnée par l'équation suivante :

$$d_\phi = C \times Y_\phi, \quad (1.1)$$

Y_ϕ est la charge de la phase ϕ , calculée comme suit :

$$Y_\phi = \max_{i \in \phi} (Y_i), \quad (1.2)$$

avec, $Y_i = \frac{A_i}{S_i}$ est la charge de la voie i . A_i et S_i sont respectivement le débit moyen d'arrivées et le débit de saturation de la voie i .

C est la durée de cycle donné par :

$$C = \frac{T_p}{1 - \sum_{\phi} Y_\phi}, \quad (1.3)$$

où, T_p est le temps total perdu.

1.4.1.2 La méthode de Webster

La méthode de Webster [Webster, 1958] est développée pour calculer la durée optimale d'un cycle ainsi sa répartition en durée de vert d'une manière à minimiser le temps perdu par les véhicules pendant leur traversée de l'intersection. Webster propose alors de calculer la durée de cycle optimal et sa répartition par les équations (1.4) et (1.5) respectivement :

$$C = \frac{1.5T_p + 5}{1 - Y} \quad (1.4)$$

$$d_\phi = \frac{Y_\phi}{Y}(C - T_p) \quad (1.5)$$

Les différents paramètres de cette méthode sont expliqués dans le paragraphe 1.4.1.1.

1.4.1.3 La méthode de TRANSYT

TRANSYT [Robertson, 1969] permet d'évaluer la qualité de la commande des feux et leurs réglages au niveau d'un réseau d'intersections. L'ensemble des intersections fonctionnent en utilisant une durée de cycle commune et une répartition de vert qui diffèrent d'une intersection à une autre. La répartition optimale des durées de vert ainsi que les décalages optimaux entre les intersections sont basés sur l'optimisation du temps de trajet global et le nombre d'arrêts. Le critère optimisé (PI) par la méthode TRANSYT est donné par l'équation suivante :

$$PI = \sum_{i \in VC} (R_i + K.N_i), \quad (1.6)$$

où,

VC : ensemble des voies contrôlées.

R_i : temps perdu moyen sur la voie i .

N_i : nombre moyen d'arrêts par seconde sur la voie i .

K : facteur de pondération.

Cette méthode a été mise en oeuvre dans plusieurs villes à travers le monde, elle est devenue une méthode de référence largement utilisée pour l'évaluation de l'efficacité des systèmes de régulation des feux.

1.4.2 Stratégies adaptatives

L'inconvénient des méthodes présentées ci-avant est le fait de ne pas s'adapter aux fluctuations soudaines de la demande du trafic. Pour pallier cet inconvénient, de nouvelles méthodes ont été développées dites stratégies adaptatives. En tenant compte de l'évolution du trafic au cours du temps, ces méthodes ont la capacité de réagir en temps réel sur les feux de signalisation. Les méthodes adaptatives sont classées en deux catégories : adaptatives cycliques et adaptatives acycliques.

1.4.2.1. Adaptative cyclique :

Les méthodes adaptatives cycliques ont pour objectif de répartir le temps en plusieurs cycles et de répartir ces derniers en plusieurs phases. Ces systèmes restent alors proche des méthodes prédéterminées, toutefois des mises à jour sont proposées en fonction de la demande

du trafic. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

- a) **SCOOT (Split Cycle Offset Optimization Technique)** : Cette méthode a été développée au cours des années 80 par le TRRL (Traffic and Road Research Laboratory) de Grande-Bretagne [Hunt et al., 1982]. SCOOT est une méthode de coordination et de commande d'un ensemble d'intersections en temps réel. Le principe de cette méthode est d'ajuster la durée du cycle, la durée de vert et les décalages par de petites variations. Pour ajuster ces paramètres, SCOOT reçoit des informations sur le trafic en temps réel à partir du terrain. En fonction de ces données, les paramètres sont soit prolongés soit diminués de quelques secondes selon un modèle d'optimisation qui minimise la longueur des files d'attente au niveau des intersections [Gaciarz, 2016][Laurant, 2001].
- b) **SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)** : proposée en 1982 en Australie par Lowrie [Lowrie, 1982]. Cette méthode a pour objectif de minimiser les retards et les arrêts de véhicules aux intersections. Dans ce système, la régulation est répartie en deux niveaux : la régulation stratégique et la régulation tactique. La régulation stratégique est un élément de base pour SCATS, qui s'occupe de la sélection et le calcul des durées de cycle, des durées de vert et des décalages. La régulation tactique est appliquée localement au niveau de chaque intersection pour ajuster les données calculées dans le niveau stratégique [Braban and Boillot, 2003]. Le principe de fonctionnement de la méthode SCATS est illustré dans la Figure 1.2 :

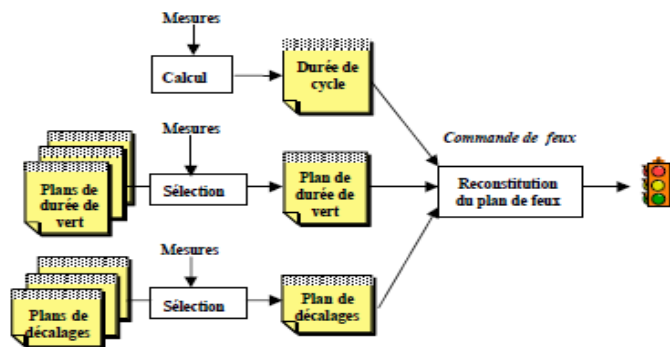


FIGURE 1.2 – Principe de fonctionnement du système SCATS.

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

1.4.2.2. Adaptative acyclique :

La régulation avec les méthodes acycliques repose sur un processus de décision permettant de balancer les feux d'un état à un autre. Sur un horizon d'optimisation fixe, ces méthodes ne permettent pas de calculer les durées de cycle et leurs répartitions mais de déterminer des séquences de feux à appliquer pour chacune des phases de l'intersection. Parmi ces méthodes, nous pouvons citer :

- a) **PRODYN (Programmation Dynamique)** : cette méthode a été développée en 1980 par le CERT, Centre d'Etude et de Recherche de Toulouse [Henry et al., 1984]. La méthode repose sur le principe de trouver les instants de passage d'un état de feux à un autre dont l'objectif est de minimiser le nombre de véhicules en file d'attente sur les différents tronçons d'une intersection. La régulation repose aussi sur un partage de données entre les intersections voisines pour une meilleure estimation du nombre de véhicules qui s'approchent d'une intersection. L'optimisation fait appel à des outils avancés comme la programmation dynamique et l'estimation Bayésienne.
- b) **UTOPIA (Urban Traffic Optimization by Integrated Automation)** : cette méthode a été développée en 1983, en Italie. Son objectif est d'assurer de meilleures conditions de circulation aux véhicules de transport en commun [Mauro and Di Taranto, 1990]. La stratégie UTOPIA repose sur trois niveaux de modélisation : un modèle macroscopique, un modèle microscopique et modèle pour les véhicules de transport en commun. Le modèle macroscopique décrit le comportement d'un ensemble de véhicules comme étant une seule entité. Le modèle microscopique décrit le comportement des véhicules d'une manière individuelle et plus précise. Le modèle de transport en commun est un modèle microscopique qui s'intéresse aux véhicules de transport en commun particulièrement. Le but de cette méthode est de déterminer une commande de feux de telle sorte à minimiser le temps d'attente aux intersections des véhicules de transport en commun [Braban and Boillot, 2003].

Conclusion

La régulation du trafic est une théorie assez vaste et complexe à travers ses diverses techniques et formes de signalisation, qui sont utilisées pour faciliter la circulation routière, augmenter la sécurité et rationaliser l'exploitation des infrastructures routières. Parmi les points importants de la régulation du trafic, nous trouvons la gestion des intersections à feux. Ces derniers jouent un rôle influent sur les conflits et le trafic d'une manière générale.

Dans ce premier chapitre, nous avons porté une attention à la théorie du trafic urbain qui a donné naissance à plusieurs modèles et méthodes pour l'étude et l'analyse de tous comportements qui peuvent influencer la qualité du trafic et la sécurité des usagers.

2

Théorie des jeux et contrôle des feux de signalisation

Introduction

La théorie des jeux est une branche mathématique qui s'intéresse à l'étude et la résolution des problèmes d'interaction entre deux ou plusieurs agents. Les agents sont amenés à prendre des décisions, chacun des agents est conscient que le résultat de son propre choix dépend aussi de celui des autres agents.

Dans le cadre de ce chapitre, nous présenterons les notions de base de la théorie des jeux. Par la suite, nous exposerons quelques modèles de la théorie des jeux utilisés dans le cadre de la résolution du problème de régulation des feux de signalisation.

2.1 Généralités

Nous présenterons ci-après quelques définitions indispensables à la compréhension de la théorie des jeux.

Définition 2.1 *Conflit (jeu) :*

Un jeu est défini comme une interaction entre deux ou plusieurs joueurs dans laquelle le profit (bien-être) de chacun ne dépend pas que de sa propre décision, mais aussi de celles prises par les autres. Il devra ainsi choisir une décision qui lui procure le plus parmi celles qui s'offrent à lui.

Définition 2.2 *Joueur :*

Toute personne qui participe au conflit (jeu), capable de prendre des décisions et d'agir pour son propre intérêt selon le principe de la rationalité individuelle.

Définition 2.3 *Stratégie : [Belakbir, 2011]*

Une stratégie est une action, ou un ensemble d'instructions qui permettent d'atteindre un but

précis. Le résultat des choix de tous les joueurs constitue une (issue) ou profil d'action du jeu.

- Une **stratégie pure** du joueur i est une action, ou un ensemble d'actions, choisie avec certitude.

- Une **stratégie mixte** en théorie des jeux est une stratégie où le joueur sélectionne au hasard le coup qu'il joue parmi les coups possibles. Cela revient à attribuer une certaine distribution de probabilité sur l'ensemble des stratégies pures du jeu. Elle est représentée par un vecteur $\alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_{n_i}) \in \Delta_i$, appelé stratégie mixte, où

$$\Delta_i = \{ \alpha = (\alpha_1, \dots, \alpha_{n_i}) \in R^{n_i} : 0 \leq \alpha_j \leq 1, \forall j \in \{1, \dots, n_i\}, \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j = 1 \};$$

où α_i est la probabilité que le joueur joue sa i -ème stratégie pure, n_i est le nombre de stratégies pures du joueur, Δ_i représente l'ensemble des stratégies mixtes du joueur i .

Définition 2.4 Gain :

Le gain d'un joueur est le bénéfice qui résulte des choix de tous les joueurs.

Définition 2.5 Interaction :

Toute action choisie par un joueur influe sur celle des autres joueurs.

Définition 2.6 Rationalité individuelle :

La rationalité individuelle d'un joueur est une règle de maximisation du profit individuel.

2.2 Classification des jeux

En fonction des caractéristiques telle que : nombre de joueurs, type de gain, le comportement des joueurs, ...etc, les jeux sont classés en plusieurs catégories.

2.2.1 Jeux à somme nulle et à somme non nulle

Un **jeu à somme nulle** est un jeu où la somme des gains de tous les joueurs est égale à 0 en toute issue du jeu. Cela signifie donc que le gain de l'un constitue obligatoirement une perte pour les autres, les échecs ou le poker sont des jeux à somme nulle.

Quand la somme des gains est différente de zéro, alors le jeu est dit **jeu à somme non nulle**.

2.2.2 Jeux coopératifs et non-coopératifs

Un **jeu coopératif** est un jeu dans lequel les joueurs ont la possibilité de se concerter et de s'engager à coopérer avant de définir la stratégie à adopter. Si ces conditions ne sont pas vérifiées et si les joueurs ne peuvent pas communiquer entre eux, le jeu est dit **Jeu non**

coopératif. Les raisons essentielles d'un tel comportement peuvent être l'impossibilité de communication, les intérêts opposés des joueurs, la perte de confiance entre les joueurs, ou bien il y a interdiction de former des coalitions [SAIT, 2008].

2.2.3 Jeu simultané

Dans un **jeu simultané**, les joueurs décident en même temps de leur stratégie (exemple : le dilemme du prisonnier, le jeu pierre-feuille-ciseaux et le jeu du duopole de Cournot) [Barache, 2007].

2.2.4 Jeu séquentiel (dynamique)

Dans un **jeu séquentiel**, on peut spécifier l'ordre des décisions de sorte qu'un joueur peut décider de sa stratégie conditionnellement à ce qu'ont joué les autres joueurs précédemment (exemple : le jeu d'échecs et le jeu de go).

Ce jeu se caractérise par : un ensemble de joueurs ; un déroulement, l'information et les actions à disposition de chaque joueur au moment où ils jouent ; et de paiements à la fin du jeu, qui dépendent de l'historique du jeu [Barache, 2007].

2.2.5 Méta jeu

Désigne, dans le cadre d'un jeu, l'ensemble des stratégies et des méthodes qui ne sont pas explicitement prescrites par quelque règle que ce soit, mais qui résultent de la seule expérience des joueurs qui émerge en dépit de ce que les développeurs avaient prévu.

2.3 Présentation d'un jeu sous forme normale

Un jeu sous forme normale est donné par le triplet

$$\langle I, \{X_i\}_{i \in I}, \{f_i\}_{i \in I} \rangle \quad (2.1)$$

- $I = \{1, 2, \dots, n\}$ est l'ensemble des joueurs.
- X_i : l'ensemble des stratégies de chaque joueur i . L'issue x du jeu correspond au vecteur $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, où $x_i \in X_i$ est la stratégie jouée par le joueur i .
- les gains (utilités) pour les joueurs sur l'ensemble $X = \prod_{i=1}^n X_i$ des issues $x \in X$ sont représentées par une fonction $f_i : X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow R$. [RADJEF, 2015]

2.4 Présentation d'un jeu sous forme extensive

Un jeu sous forme extensive est présenté comme un arbre de "Kuhn". Chaque sommet de l'arbre spécifie le (ou les) joueur (s) qui doit (doivent) choisir une action à un moment donné. La forme extensive est utilisée pour représenter les jeux séquentiels où les joueurs choisissent

leurs stratégies à tour de rôle. Les gains que chaque joueur peut réaliser sont donnés au niveau des sommets terminaux de l'arbre.

Exemple 2.1 Jeu d'entrée sur un marché : [Barache, 2007]

Nous considérons une entreprise, notée NV (pour Nouveau Venu), qui envisage de produire un bien dont l'offre est le fait d'une autre entreprise M (pour Monopole).

Pour l'entreprise M, elle a deux choix : soit elle cède en limitant sa production afin d'éviter un affrontement des prix dans le cas où l'entreprise NV entre, soit elle ne cède pas en maintenant la même offre. Nous avons les situations possibles suivantes :

- NV n'entre pas et M ne cède pas : dans ce cas, l'entreprise NV n'en tire aucun profit. ($U_{NV} = 0$) par contre l'entreprise M en tire le profit maximal $U_M = 10$.
- NV entre et M cède : dans ce cas, il y a un partage des ventes et des bénéfices qu'on peut supposer : $U_{NV} = U_M = 4$.
- NV entre et M ne cède pas : dans ce cas, les deux entreprises produisent à perte et on peut supposer : $U_{NV} = -3$ et $U_M = -2$;
- NV n'entre pas et M cède, alors : $U_{NV} = 0$ et $U_M = 10$.

La forme extensive du jeu présenté ci-avant est illustrée dans la Figure (2.1).

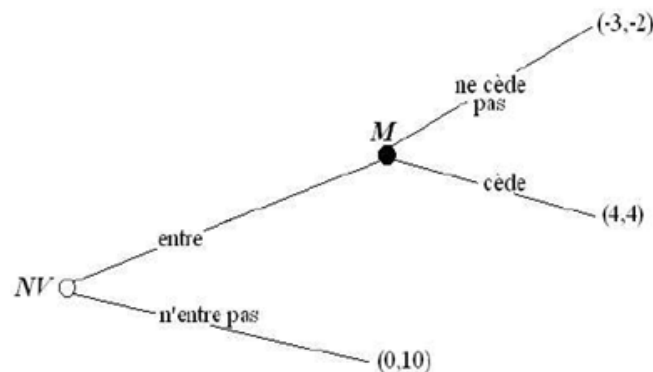


FIGURE 2.1 – Forme extensive du jeu d'entrée sur un marché

2.5 Concepts de solution

En théorie des jeux, un concept de solution est un processus par lequel les équilibres d'un jeu sont identifiés. Ils sont donc employés comme des prédictions de jeu, suggérant quel sera le résultat du jeu.

2.5.1 Stratégie de meilleure réponse

En théorie des jeux, la meilleure réponse est la stratégie ou l'ensemble de stratégies qui produisent le résultat immédiat le plus favorable au joueur considéré, étant données les stratégies des autres joueurs.

Définition 2.7 Une stratégie pure x_i est une **meilleure réponse** aux stratégies des autres joueurs x_{-i} dans le jeu (2.1) si :

$$f_i(x_i, x_{-i}^*) \geq f_i(y_i, x_{-i}^*); \quad \forall y_i \in X_i. \quad (2.2)$$

$$X_{-i} = \prod_{j \in N \setminus \{i\}} X_j = X_1 \times \dots \times X_{i-1} \times X_{i+1} \times \dots \times X_N.$$

On note $B(x_{-i})$, l'ensemble de toutes les stratégies qui sont une meilleure réponse à x_{-i} :

$$B(x_{-i}) = \{x_i \mid f_i(x_i, x_{-i}^*) \geq f_i(y_i, x_{-i}^*); \quad \forall y_i \in X_i\} \quad (2.3)$$

2.5.2 Équilibre de Nash

L'équilibre de Nash doit son nom au mathématicien et économiste américain John F. Nash, qui a introduit ce concept en 1950 dans sa thèse de doctorat. Dit aussi équilibre non coopératif de Nash, est basée sur le principe de rationalité individuelle. Cette notion d'équilibre désigne une situation où chacun des joueurs maximise ses gains. Il décrit ainsi une issue dans laquelle aucun joueur ne souhaite modifier sa stratégie étant donnée les stratégies de ses adversaires.

Définition 2.8 Une situation $x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) \in X$ est un **équilibre de Nash** en stratégies pures du jeu (2.1), si pour chaque joueur :

$$f_i(x_i^*, x_{-i}^*) \geq f_i(x_i, x_{-i}^*); \quad \forall x_i \in X_i, \forall i \in I. \quad (2.4)$$

Définition 2.9 On dit que la stratégie $x_i \in X_i$ est **dominé** dans un jeu, s'il existe une autre stratégie $y_i \in X_i$, tel que :

$$f_i(y_i, x_{-i}) > f_i(x_i, x_{-i}); \quad \forall x_{-i} \in X_{-i}. \quad (2.5)$$

où ;

$$(y_i, x_{-i}) = (x_1, \dots, x_{i-1}, y_i, x_{i+1}, \dots, x_N)$$

2.6 Application de la théorie des jeux à la régulation des feux de signalisation

Le contrôle des feux de signalisation est l'un des moyens les plus efficaces pour réduire et alléger la congestion urbaine. De plus, le contrôle du trafic peut être classé en deux catégories ; le contrôle des intersections isolées et le contrôle d'un réseau d'intersections inter-connectées. Nous présenterons ci-dessous quelques modèles de jeux qui ont été développés pour la résolution du problème de contrôle des feux aux intersections. Pour chaque modèle, nous présenterons les outils de la modélisation ainsi que les méthodes de résolution utilisées. Nous avons proposé de classer ces modèles en deux catégories : les modèles de jeux coopératifs et les modèles de jeux non coopératifs.

2.6.1 Jeux non-coopératifs

Les jeux non coopératifs sont utilisés dans la régulation des feux de signalisation pour modéliser la concurrence qui se produit entre les phases d'une intersection lors du partage de la durée du cycle.

Dans [Villalobos et al., 2008], un jeu non coopératif à deux joueurs a été proposé pour la résolution du problème de contrôle des feux de signalisation à deux phases (voir Figure 2.2). Les auteurs ont proposé de modéliser les deux rues comme étant deux joueurs qui cherchent

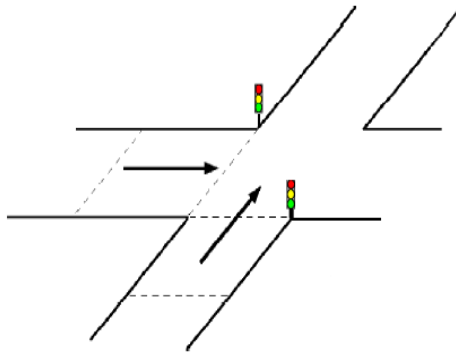


FIGURE 2.2 – Intersection à deux phases.

à augmenter la durée de leurs feux verts afin de minimiser la longueur de leurs files d'attente de véhicules. Les composantes du jeu proposé sont :

- $I = \{1, 2\}$ l'ensemble des joueurs, chaque joueur représente une rue.
- Une stratégie pour un joueur $i \in I$ est vecteur $x_i = (x_{i1}, x_{i2}) \in R^2$, où x_{i1} est la durée du feu rouge et x_{i2} est la durée du feu vert.
- $f_i(x)$ est la fonction d'utilité du joueur $i \in I$, dépendant de l'issue du jeu $x = (x_1, x_2) \in X_1 \times X_2$. Elle est définie par :

$$f_{(1)}(x) = \sum_{i_1=1}^n i_1 P_{i_1}(x_{i_1}, x_{i_2}) \rightarrow \min_{x_{i_1}}^{k_1} \in S^2 \quad (2.6)$$

$$f_{(2)}(d) = \sum_{i_2=1}^n i_2 P_{i_2}(x_{i_1}, x_{i_2}) \rightarrow \min_{x_{i_2}}^{k_2} \in S^2 \quad (2.7)$$

Où : P_{i_1} et P_{i_2} sont les probabilités de transitions calculées à l'aide des chaînes de Markov. x_{i_1}, x_{i_2} sont les stratégies de contrôle des jours 1 et 2 respectivement. $\min_{x_{i_1}}$ et $\min_{x_{i_2}}$ exprime le fait que chaque joueurs vise a minimiser sa file d'attente. Pour plus de détails veuillez consulter [Villalobos et al., 2008].

La solutions de ce jeu est l'équilibre de Nash calculé à l'aide de la méthode extra-proximale, voir l'équation (11) de [Villalobos et al., 2008] qui permet de déterminer les durées à l'équilibre des feux verts des deux rues de l'intersection, tenant compte des objectifs de minimisation des longueurs des files d'attente sur chacune d'elles. L'équilibre de Nash, comme son nom l'indique, ne permet d'obtenir une solution optimale.

Dans [Bui et al., 2017], deux modèles de jeu oligopole ont été formulés pour le contrôle des feux de signalisation, à savoir, le modèle de Cournot et le modèle de Stackelberg. Les deux modèles s'intéressent à la régulation des feux au niveau d'une intersection à deux phases Φ_1 et Φ_2 (voir la Figure 2.3). Particulièrement, le modèle de Stackelberg est utilisé en cas d'apparition de véhicules prioritaires sur l'une des phases de l'intersection. L'objectif est de minimiser le temps d'attente des véhicules à l'intersection en se basant sur théorie des jeux et l'internet des objet (AGT-IoT).

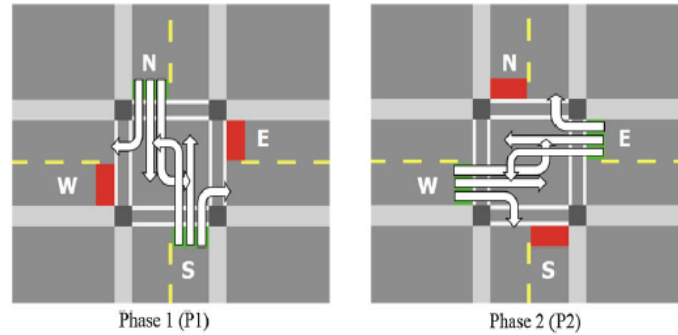


FIGURE 2.3 – Les phases d'un cycle complet à feux de signalisation

Les interactions des phases sont des interactions stratégiques, d'où le jeu stratégique du problème du trafic est décrit par le triplet $G = \langle I, \{t_i\}_{i \in I}, \{f_i\}_{i \in I} \rangle$:

- $I = \{1, 2\}$ est l'ensemble des joueurs, chaque joueur représente une phase ;
- $t_i \in [0, T]$ est la stratégie du joueur $i \in I$ qui représente la durée du feu vert de la phase Φ_i , $i \in I$. $t_1 + t_2 = T$ est la durée du cycle ;

- La fonction utilité d'un joueur $i \in I$, déterminant le nombre de véhicules en attente sur la phase Φ_i à la fin du cycle, est définie par :

$$\begin{cases} f_i : [0, T]^2 \rightarrow \mathbb{R} \\ f_i(t_i, t_{-i}) = \gamma_i + \alpha_i t_{-i} + \beta_i t_i \end{cases} \quad (2.8)$$

où :

γ_i est le nombre de véhicules en attente sur la phase Φ_i au début du cycle.

α_i est le taux d'arrivée des véhicules durant la phase Φ_i .

β_i est le taux de départ des véhicules durant la phase Φ_i .

Dans le cas de non-apparition de véhicules prioritaires, le modèle de Cournot est utilisé pour calculer les durées de feu vert des deux phases de l'intersection. Le but d'un joueur étant d'avoir zéro véhicules en attente à la fin du cycle, alors le point d'équilibre Cournot-Nash est donné par (t_1^*, t_2^*) :

$$t_1^* = \frac{\gamma_1 - \gamma_2 + T(\alpha_1 + \beta_2)}{\alpha_1 + \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2} \quad (2.9)$$

et

$$t_2^* = \frac{\gamma_2 - \gamma_1 + T(\alpha_2 + \beta_1)}{\alpha_1 + \beta_1 + \alpha_2 + \beta_2} \quad (2.10)$$

Dans le cas où un véhicule prioritaire est détecté sur une phase, cette phase est considérée comme leader et l'autre phase comme suiveur. Ainsi le problème de contrôle des feux de signalisation est représenté par le modèle de Stackelberg. À cet égard pour déterminer l'équilibre dans le modèle de Stackelberg, la méthode d'induction vers l'arrière (backward) est utilisée. La solution du jeu est alors donnée par :

$$t_1^* = \frac{\gamma_1}{\beta_1} + \frac{\alpha_1(\gamma_2 + T\alpha_2)}{\beta_1(\alpha_2 + \beta_2)}, \quad (2.11)$$

et

$$t_2^* = \frac{\gamma_2}{\beta_2} + \frac{\gamma_1\alpha_2}{\beta_1\beta_2} + \frac{\alpha_1\alpha_2(\gamma_2 + T\alpha_2)}{\beta_1\beta_2(\alpha_2 + \beta_2)}. \quad (2.12)$$

2.6.2 Jeux coopératifs

Dans le cadre de la régulation du trafic routier dans des intersections signalisées en utilisant les jeux coopératifs, les phases d'une intersection ont la possibilité de se concerter et de s'engager à coopérer pour améliorer les conditions de circulation aux intersections. Parmi ces travaux, nous pouvons citer : [Yang and A.Rakha, 2016], [Bui and Jung, 2018].

Dans [Yang and A.Rakha, 2016], un jeu coopératif pour la résolution du problème de contrôle des feux de signalisation a été développé. Les auteurs ont proposé un jeu coopératif à quatre joueurs de contrôle, qui modélise une intersection signalisée à quatre phases où chaque phase est considérée comme un joueur. Par la suite, les joueurs coopèrent pour parvenir à un accord mutuel afin de minimiser et égaliser les longueurs de leurs files d'attente de véhicules sur les différentes phases en se basant sur la théorie des jeux de négociation de Nash. Les composantes du jeu présenté sont :

- $I = \{1, 2, 3, 4\}$ l'ensemble des joueurs, où chaque joueur i représente la phase Φ_i .
- Une stratégie d'un joueur $i \in I$ est un vecteur de décision $x_i = (x_{i1}, x_{i2})$, où x_{i1} désigne l'instant final de maintenir son feu vert et x_{i2} désigne l'instant initial de choisir son feu vert. On notera par X_i l'ensemble des stratégies du joueur $i \in I$.
- $f_i(x_1, x_2, x_3, x_4)$ est la fonction utilité d'un joueur $i \in I$, représente ici, le nombre de véhicule en file d'attente sur la phase Φ_i à l'instant $t + \Delta t$:

$$f_i(t + \Delta t) = \sum_{l \in \Phi_i} f_l^t + f_{inl} \Delta t - f_{outl} \Delta t, \quad (2.13)$$

où, f_{inl} et f_{outl} sont le débit d'arrivée et de départ de véhicules sur une voie l , respectivement. f_l^t est le nombre de véhicules en files d'attente dans la voie l à l'instant t , qui est formulé comme suit :

$$f_l^t = \sum_{v \in v_l^t} f_v^t, \quad (2.14)$$

et,

$$f_v^t = \begin{cases} 1 & si \ s_v^t - 1 > S^{Th}, \ s_v^t \leq S^{Th} \\ -1 & si \ s_v^t - 1 \leq S^{Th}, \ s_v^t > S^{Th} \\ 0 & si \ \begin{cases} s_v^t - 1 \leq S^{Th}, \ s_v^t \leq S^{Th} \\ s_v^t - 1 > S^{Th}, \ s_v^t > S^{Th} \end{cases} \end{cases} \quad (2.15)$$

(s_v^t) est la vitesse du véhicule (v) à l'instant (t), (S^h) est un seuil de vitesse donné à l'instant t .

La solution de négociation Nash sur les combinaisons de phases a la formule suivante :

$$\max_{(u_1, \dots, u_4)} \prod_{i=1}^4 (u_i - d_i), \quad (u_1, \dots, u_4) \in S(u_1, \dots, u_4) > (d_1, \dots, d_4) \quad (2.16)$$

Pour chaque joueur $i \in I$, u_i remplace la fonction utilité $f_i(t + \Delta t)$, de plus, $\{d_i\}_{i \in I}$ correspond aux utilités minimales que les joueurs ne pas veulent atteindre.

Cette solution peut être calculée comme vecteur qui maximise le produit des gains d'utilité du joueur par rapport à un point de désaccord fixe.

Dans [Bui and Jung, 2018], les auteurs se sont intéressés à la régulation des feux de signalisation au niveau d'un réseau d'intersections, où chaque intersection a quatre directions (voir Figure 2.4) et trois voies pour les véhicules dans la direction d'arrivée sont : aller-avant, tourner à droite et tourner à gauche, et sont gérés par un contrôleur situé à chaque intersection (voir figure 2.4).

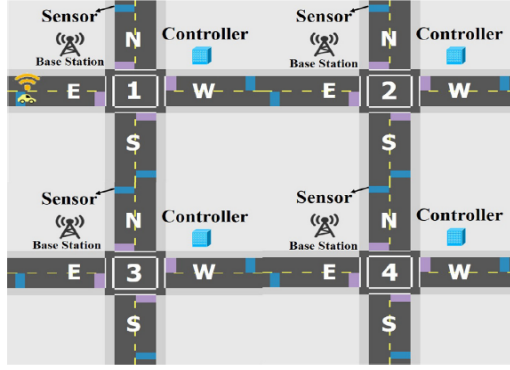


FIGURE 2.4 – Plusieurs intersections dans un environnement connecté.

Pour se faire, une approche par la théorie des jeux coopératifs a été proposée. Cette dernière est basée essentiellement sur les jeux de coalitions et le modèle de Cournot[Bui et al., 2017], qui permettent alors aux intersections de coopérer via des réseaux sans fil, de prendre la décision en temps réel sur la durée du système de feux de signalisation, afin de minimiser le temps d'attente des véhicules et d'améliorer la fluidité du trafic dans l'ensemble du réseau.

Initialement, les durées de feux verts sont calculées en se basant sur le modèle de Cournot, où les durées des feux verts des deux phases d'une intersection sont calculées en utilisant les équations (2.9) et (2.10). Par la suite, après la coopération de ces intersections et l'échange d'informations sur l'état du trafic, une mise à jour pour les durées de vert est proposée, en se basant sur le jeu de coalition suivant :

- $I = \{1, 2\}$ est l'ensemble des joueurs, représentant deux intersection voisines dans un réseau.(intersection 1 et 2 dans la figure 2.4)
- $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}\}$ est l'ensemble des stratégies du joueur i , où x_{i1} est la stratégie du joueur i en choisissant de coopérer et d'échanger ses données (les densités de trafic de chaque agent) à chaque durée de cycle, x_{i2} est la stratégie de non coopération.
- $F : 2^N \rightarrow R$ est la fonction caractéristique définie sur l'ensemble de toutes les coalitions possibles satisfaisant $F(\emptyset) = 0$. L'utilité (gain) réel de chaque joueurs (intersection) peut être formulée comme suit :

$$f_{i\{S \cup W\}}(t_i, t_{-i}) = Q_i + t_{-i}\alpha_i + t'\gamma_i - t_i\beta_i \quad (2.17)$$

où :

Q_i est le nombre de véhicules qui attendent à la phase du joueur i .

t_i et t_{-i} sont les durées de feu vert du joueur $i \in I$.

α_i et β_i sont les taux de véhicules arrivant et partant à la phase du joueur i , respectivement.

γ_i est vitesse avec laquelle les véhicules arrivent en phase du joueur i depuis l'intersection voisine.

t' est la durée du feu vert de l'intersection voisine.

Dans le cas de la non-coopération, la solution est celle donnée par les équations (2.11) et (2.12) du modèle de Cournot [Bui et al., 2017].

Conclusion

Ce chapitre est réparti en deux parties. Dans un premier temps, nous avons présenté les notions de base de la théorie des jeux, quelques classes de jeux et leurs concepts de solution. Dans la seconde partie, nous avons présenté quelques modèles de jeux qui ont été développés pour la résolution du problème de contrôle des feux aux intersections.

3

Modèle du jeu non-coopératif avec contraintes

Introduction

La ville de Bejaïa est connue pour ses embouteillages interminables. A l'instar des grandes villes algériennes et à la faveur du flux de voitures né pour l'essentiel des crédits automobiles accordés durant les années précédentes, la circulation est devenue dans la capitale des Hammadites assez infernale et avec des carrefours connus pour être les points noirs de la ville de Bejaia.

Dans ce chapitre, nous présenterons un modèle de jeux non coopératifs avec contraintes qui a été développé dans [Mahiout et al., 2020] dans le cadre de ses travaux de recherche de sa thèse de doctorat au département de Recherche Opérationnelle à l'Université Abderrahmane Mira de Béjaïa. Nous appliquerons ce modèle pour l'étude du contrôle de l'intersection du Rameau d'olivier, considérée comme une des plus congestionnées au niveau de la ville de Béjaïa.

3.1 Position du problème

L'intersection du Rameau d'olivier se situe à l'encontre de deux routes principales de la ville de Bejaia (route des Aurès et route des résidences universitaires). La route des Aurès est l'une des routes les plus fréquentées par les automobilistes pour accéder à la capitale des Hammadites.

Les routes de l'intersection du Rameau d'olivier sont à double sens, ainsi, l'intersection est composée de plusieurs liens notés par $R = \{R_1; R_2; \dots; R_8\}$. Chaque lien de l'intersection est composé de trois voies; une voie pour les véhicules allant tout droit une pour les véhicules tournant à gauche et une dernière pour les véhicules tournant à droite, voir la Figure 3.1.



FIGURE 3.1 – Les mouvements du trafic au niveau de l'intersection Rameau d'olivier

Nous présenterons dans le Tableau 3.1 l'ensemble des mouvements de l'intersection et la nature du feu utilisé pour chaque mouvement.

$(R_a; R_b)$	Destination	État du feu	Voie	Indexation
$(R_2; R_4)$	route des Aurés (de la zone) vers la route des résidences	le feu change	voie 1 de la route des Aurés(Zone)	a1
$(R_2; R_6)$	route des Aurés (de la zone vers Naceria)	le feu change	voie 2 de la route des Aurés(Zone)	a2
$(R_2; R_8)$	route des Aurés (de la zone) vers Oued Es Seghir	toujours en vert	voie 3 de la route des Aurés(Zone)	a3
$(R_3; R_6)$	routes des résidences vers routes des Aurés (vers Naceria)	le feu change	voie 1 de la route des résidences	b1
$(R_3; R_8)$	routes des résidences vers Oued Es Seghir	le feu change	voie 2 de la route des résidences	b2
$(R_3; R_1)$	routes des résidences vers route des Aurés (vers la zone)	toujours en vert	voie 3 de la route des résidences	b3
$(R_5; R_8)$	route des Aurés (de Naceria) vers Oued Es Seghir	le feu change	voie 1 de la route des Aurés (Nacéria)	c1
$(R_5; R_1)$	route des Aurés (de Naceria vers la zone)	le feu change	voie 2 de la route des Aurés (Nacéria)	c1
$(R_5; R_4)$	route des Aurés (de Naceria) vers la route des résidences	toujours en vert	voie 3 de la route des Aurés (Nacéria)	c2
$(R_7; R_1)$	Oued Es Seghir vers routes des Aurés (vers la zone)	le feu change	voie 1 de la route Oued Es Sghir	d1
$(R_7; R_4)$	Oued Es Seghir vers routes des résidences	le feu change	voie 1 de la route Oued Es Sghir	d1
$(R_7; R_6)$	Oued Es Seghir vers routes des Aurés (vers Naceria)	toujours en vert	voie 2 de la route Oued Es Sghir	d2

TABLE 3.1 – Ensemble de voies et mouvements de l'intersection et la nature du feu utilisé

Les mouvements dont l'état du feu change peuvent engendrer des conflits. Afin de sécuriser le passage des véhicules, ces mouvements sont répartis en plusieurs phases. Soit $\phi = \{\phi_1; \phi_2; \phi_3; \phi_4\}$ l'ensemble des phases de l'intersection du rameau d'olivier, voir la Figure 3.2.

Il y a des mouvements qui sont actuellement autorisés, mais qui ne ressortent pas dans la répartition en phases : $(R_5, R_4), (R_3, R_1), (R_2, R_8); (R_7, R_6)$ et qui peuvent être intégrés dans les phases ainsi définies. Ces mouvements sont toujours en vert parce qu'ils sont pas conflictuel.

$$\phi_1 = \{(R_2; R_6); (R_2; R_4)\}$$

$$\phi_2 = \{(R_5; R_1); (R_5; R_8)\}$$

$$\phi_3 = \{(R_3; R_8); (R_3; R_6)\}$$

$$\phi_4 = \{(R_7; R_4); (R_7; R_1)\}$$



FIGURE 3.2 – Les phases de l'intersection Rameau d'olivier

Actuellement, le contrôle des feux de signalisation au niveau de l'intersection du Rameau d'olivier utilisé est basé sur un plan de feux fixe (plus de détails seront donnés dans le chapitre suivant). Ce dernier ne s'adapte pas à la demande du trafic des différents mouvements de l'intersection. Pour remédier, nous avons proposé de modéliser le problème du contrôle du trafic à l'intersection Rameau d'olivier avec une approche de la théorie des jeux. Notre objectif est de déterminer un équilibre entre les phases en fonction de la demande du trafic et d'améliorer la fluidité au niveau de cette intersection.

3.2 Modélisation

Dans cette section, nous allons présenter un jeu non coopératif avec contraintes modélisant le problème de contrôle des feux au niveau de l'intersection du rameau d'olivier.

Considérons que chaque phase ϕ_i est contrôlée par un joueur i , où $I = \{1, 2, 3, 4\}$ est l'ensemble des joueurs du jeu. La stratégie X_i de chaque joueur $i \in I$ consiste à choisir le temps de feu vert $t_i \in \mathcal{R}$ de sa phase.

$$X_i \in \mathcal{R}, \forall i \in I \quad (3.1)$$

Le temps de feu vert t_i choisi par le joueur $i \in I$ doit vérifier les «conditions pratiques» des feux de circulation à la jonction, à savoir :

- Compte tenu de l'interaction entre les phases, si les acteurs(joueurs) $j \in I \setminus \{i\}$ ont choisi les durées de leurs feux verts $t_j \in X_j$, le joueur i est limité à choisir sa durée du vert telle que la somme des durées de tous les joueurs ne dépasse pas la durée du cycle T :

$$t_i \leq T - \sum_{j \in I \setminus \{i\}} t_j. \quad (3.2)$$

- la durée du feu vert t_i doit être supérieure à une certaine durée minimale $t_{min,i} > 0$ pour permettre aux conducteurs de réagir et de quitter la zone du conflit.

$$t_i \geq t_{min,i}, \quad i \in I \quad (3.3)$$

- Chaque joueur i ne doit pas choisir une durée du vert supérieure à la durée qui lui permet de vider sa file d'attente :

$$t_i \leq \frac{\gamma_i + \mu_i \sum_{j=1, j \neq i}^4 t_j}{\omega_i - \mu_i}, \quad (3.4)$$

où, γ_i , μ_i et ω_i sont les variables qui reflètent l'état de trafic dans la jonction :

- γ_i : le nombre de véhicules en attente sur la phase ϕ_i au début du cycle ;
- $\mu_i(s)$: le taux d'arrivées de véhicules pour la phase ϕ_i au temps $s \in [0, T]$,
- $\omega_i(s)$: le taux de départ des véhicules pour la phase ϕ_i au temps $s \in [0, T]$.

Sur la base des règles de la route à la jonction signalisée, nous avons les hypothèses suivantes, pour tout $i \in I$:

Hypothèse 1 : Le taux d'arrivée des véhicules est constant pendant le cycle, alors :

$$\mu_i(s) = \mu_i, \quad \forall s \in [0, T] \quad (3.5)$$

Hypothèse 2 : Le taux de départ des véhicules est constant pendant la durée de vert, et elle est égale à zéro pendant la durée de la lumière rouge, alors :

$$\omega_i(s) = \begin{cases} \omega_i, & \text{si } s \in [t_i^b, t_i^e] \subseteq [0, T] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

où : t_i^b, t_i^e sont les instants de début et de fin du feu vert pour la phase i , respectivement.

Hypothèse 3 : Lorsque le feu de circulation est vert sur la phase i , le taux d'arrivée est strictement inférieur au taux de départ dans cette phase, alors :

$$\forall i \in I, \quad \mu_i < \omega_i \quad (3.7)$$

★ Considérons la notation $t = (t_i, t_{-i}) \in X_i \times X_{-i} = X$ pour exprimer le choix $t_i \in X_i$ d'un joueur $i \in I$; $X_{-i} = \prod_{j \in I \setminus \{i\}} X_j$

Une issue du jeu $t \in X = \prod_{i \in I} X_i$ est réalisable, si :

$$\forall i \in I, \quad t_i \in C_i(t_{-i}) \quad (3.8)$$

où la correspondance $C_i(\cdot) : X_{-i} \rightarrow X_i$ est la règle de décision du joueur $i \in I$ définie par :

$$C_i(t_{-i}) = \{t_i \in R, \quad g_{ik}(t_i, t_{-i}) \leq 0, \quad k = 1, 2, 3\}, i \in I. \quad (3.9)$$

Avec :

$$g_{i1}(t_i, t_{-i}) = \sum_{i=1}^4 t_i - T, \quad \forall i \in I \quad (3.10)$$

$$g_{i2}(t_i, t_{-i}) = -t_i + t_{\min, i}, \quad \forall i \in I \quad (3.11)$$

$$g_{i3}(t_i, t_{-i}) = (\omega_i - \mu_i)t_i - \mu_i \sum_{j=1, j \neq i}^4 t_j - \gamma_i, \quad \forall i \in I \quad (3.12)$$

Une fois que chaque joueur $i \in I$ ait choisi la durée du feu vert $t_i \in X_i$ pour sa phase et l'issue $t \in X$ est réalisable, $t_i \in C_i(t_{-i})$; $i \in I$, le nombre de véhicules restants dans les liens de la phase ϕ_i à la fin du cycle est donné comme suit :

$$f_i(t_i, t_{-i}) = \gamma_i + \mu_i \sum_{j=1, j \neq i}^4 t_j + (\mu_i - \omega_i)t_i. \quad (3.13)$$

La fonction $f_i(\cdot) : X_i \times \prod_{j \in I \setminus \{i\}} X_j \rightarrow R$ est considérée comme la fonction de paiement du joueur $i \in I$ qui sera minimisée.

★ Le problème de la commande des feux de circulation à la jonction isolée à quatre phases est modélisé par un méta-jeu non coopératif à quatre joueurs (Jeu non coopératif avec contraintes [Debreu, 1952]).

$$\Gamma = \langle I, \{X_i\}_{i \in I}, \{C_i\}_{i \in I}, \{f_i\}_{i \in I} \rangle \quad (3.14)$$

Le concept de solution habituellement utilisé pour résoudre le jeu Γ est l'équilibre de Nash généralisé (GNE), appelé équilibre social [Aubin, 2013].

Définition 3.1 Une issue $t^* \in X$ est un (GNE) du méta-jeu (3.14), si les deux assertions suivantes sont satisfaites $\forall i \in I$:

- $t_i^* \in C_i(t_{-i}^*)$
- $f_i(t_i^*, t_{-i}^*) \leq f_i(t_i, t_{-i}^*), \quad \forall t_i \in C_i(t_{-i}^*)$

Sur la base des conditions d'existence de (GNE) établies par "Rosen" dans [Rosen, 1965], tant que l'objectif et les fonctions de contrainte sont linéaires, on peut conclure :

Théorème 1 :[Mahiout et al., 2020] S'il existe un $t \in R^4$ tel que :

$$t_i \in C_i(t_{-i}), \quad \forall i \in I. \quad (3.15)$$

alors le méta-jeu (3.14) admet un un équilibre de Nash généralisé.

Pour trouver le (GNE) du méta-jeu (3.14) nous serons contraints de résoudre simultanément les quatre problèmes d'optimisation

$$\min_{t_i \in C_i(t_{-i})} f_i(t_i, t_{-i}), \quad \forall i \in I = \{1, 2, 3, 4\}. \quad (3.16)$$

Sachant que les fonctions des contraintes (3.10)-(3.12) et la fonction de paiement (3.13) des joueurs sont linéaires, le problème (3.16) est appelé un problème d'équilibre de Nash généralisé linéaire (LGNEP) [Dreves and Sudermann-Merx, 2016].

Dans la section suivante, notre intérêt sera porté à la résolution du (LGNEP).

3.3 Résolution

Dans cette section, l'intérêt sera porté à rechercher un équilibre de Nash généralisé du méta-jeu (3.14), en résolvant le problème d'équilibre de Nash généralisé linéaire (3.16).

Étant donné $t_{-i} \in R^3$, La fonction de paiement d'un joueur $i \in I$ dans le problème linéaire (3.16) est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \theta_i : R \rightarrow R. \\ \theta_i(t_i, t_{-i}) = (\mu_i - \omega_i)t_i. \end{cases} \quad (3.17)$$

La résolution du (LGNEP) (3.16) est équivalente à la résolution du (LGNEP) suivant :

$$\min_{t_i} \theta_i(t_i, t_{-i}) \quad \text{st.} \quad t_i \in C_i(t_{-i}), \quad \forall i \in I, \quad (3.18)$$

où les fonctions $\theta_i, i \in I$, sont définies par (3.17).

Les correspondances $C_i(t_{-i}), i \in I$, des contraintes peuvent être exprimées comme suit :

$$C_i(t_{-i}) = \{t_i \in R \mid A^{ii}t_i + \sum_{j=1, j \neq i}^4 A^{ij}t_j \leq b^i\}; \quad (3.19)$$

$$b^i = \begin{pmatrix} -t_{min,i} \\ \gamma_i \\ T \end{pmatrix}, \quad A^{ii} = \begin{pmatrix} -1 \\ \omega_i - \mu_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad A^{ij} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\mu_i \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \forall j \in I \setminus \{i\}.$$

Notons par :

$$\tilde{A} = \{\tilde{A}^{11}, \tilde{A}^{22}, \tilde{A}^{33}, \tilde{A}^{44}\}$$

$$\tilde{A}^{11} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_1 - \mu_1 \\ -\mu_2 \\ -\mu_3 \\ -\mu_4 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}^{22} = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ -\mu_1 \\ \omega_2 - \mu_2 \\ -\mu_3 \\ -\mu_4 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}^{33} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ -\mu_1 \\ -\mu_2 \\ \omega_3 - \mu_3 \\ -\mu_4 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}^{44} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -\mu_1 \\ -\mu_2 \\ -\mu_3 \\ \omega_4 - \mu_4 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{b} = \begin{pmatrix} -t_{min,1} \\ -t_{min,2} \\ -t_{min,3} \\ -t_{min,4} \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \\ T \end{pmatrix}$$

L'ensemble de solutions réalisables C du problème d'optimisation (3.18) pour tous les acteurs est donnée par :

$$C = \{(t_i, t_{-i}) \in R^4 \mid \tilde{A}(t_i, t_{-i}) \leq \tilde{b}\}. \quad (3.20)$$

Notons que sous l'hypothèse (3.15), l'ensemble C est non vide ($C \neq \emptyset$). D'autre part, la résolution simultanément des programmes linéaires (3.18) est équivalente à la résolution simultanément des quatre programmes linéaires suivants :

$$\{min_{t_i} \theta_i(t_i, t_{-i}) \text{ st. } \tilde{A}(t_i, t_{-i}) \leq \tilde{b}\}, \quad \forall i \in I. \quad (3.21)$$

Le problème (3.21) est appelé problème d'équilibre de Nash généralisé linéaire avec contrainte partagée (LGNEPSC) [Dreves and Sudermann-Merx, 2016].

Dans le papier [Mahiout et al., 2020], la méthode proposée est basée sur la résolution d'un système **KKT** correspondant. Les conditions nécessaires et suffisantes de **KKT** prennent la

forme donné dans le lemme suivant :

Lemme : [Dreves, 2017] [Mahiout et al., 2020] Un vecteur $t^* \in R^4$ est solution des programmes linéaires (3.21), et un (GNE) du jeu (3.14) si il existe des vecteurs $\lambda_i \in \mathcal{R}^9$ et $v_i \in \mathcal{R}^9$ pour tous $i \in I$ tels que :

$$\begin{cases} \mu_i - \omega_i + (\tilde{A}^{ii})^T \lambda_i = 0. \\ \tilde{A}t^* - \tilde{b} + v_i = 0. \\ v_i \geq 0, \quad \lambda_i \geq 0, \quad v_i^T \lambda_i = 0. \end{cases} \quad (3.22)$$

La difficulté pour déterminer la solution de ce système est le fait que le multiplicateurs $\{\lambda_i, \forall i \in I\}$ n'ont aucune relation entre eux. Pour surmonter cette difficulté, "Rosen" [Rosen, 1965] a introduit une sous-classe d'équilibres de Nash généralisés, appelés Équilibres de Nash normalisés.

Définition 3.2 : Soit t^* une solution du (LGNEPSC) (3.21) et $\lambda_i, \forall i \in I$ est le multiplicateur satisfaisant les conditions (KKT) (3.22) correspondant à cette solution. Alors, t^* sera appelé équilibre de Nash normalisé généralisé du jeu (3.14), s'il existe des poids positifs $r_i > 0; i \in I$, tels que chaque multiplicateur (KKT) $\lambda_i, \forall i \in I$ peut être exprimé par la relation suivante :

$$\lambda_i = \frac{\lambda}{r_i}, \quad (3.23)$$

où λ est le multiplicateur commun du problème d'optimisation linéaire de tous les joueurs. Tout équilibre de Nash généralisé normalisé est un (GNE), mais l'inverse n'est pas toujours vrai. Comme les fonctions objectif et les contraintes sont linéaires de t , donc on en déduit l'existence d'un équilibre de Nash généralisé normalisé pour (3.21).

Théorème 2 : [Rosen, 1965] [Mahiout et al., 2020] Un équilibre de Nash généralisé normalisé de (3.21) existe pour chaque $r > 0$ fixé.

Du Théorème 2, il a été déduit le résultat suivant permettant de réduire le calcul d'un équilibre généralisé normalisé par la résolution d'un programme linéaire.

Théorème 3 : [Mahiout et al., 2020] Un vecteur $t^* \in R^4$ est un équilibre de Nash normalisé du jeu (3.14), si et seulement s'il existe un vecteur $\lambda_i > 0, i \in I$ tel que t^* est une solution du programme linéaire suivant

$$\min \sum_{i=1}^4 r_i \theta_i(t_i, t_{-i}) \quad \text{st.} \quad (t_i, t_{-i}) \in C, \quad (3.24)$$

où $r_i > 0, \forall i \in I$.

Enfin, étant donnés les théorèmes 2 et 3, le choix d'un poids positif $r_i > 0; i \in I$ et la résolution du programme linéaire (3.24) permet de déterminer un équilibre de Nash normalisé

de (3.21) qui est un (GNE) du méta-jeu proposé (3.14).

Afin de résoudre le programme linéaire (3.24), nous utilisons la méthode dual simplexe, implémentée dans la fonction Matlab `linprog`. Nous avons opté pour cette méthode car ses performances ont été prouvées dans [Dreves and Sudermann-Merx, 2016] pour résoudre cette classe de problèmes par rapport à un algorithme ponctuel en termes de temps d'exécution et de précision des résultats.

Dans chaque durée de cycle, nous utilisons l'algorithme 1 pour déterminer les décisions concernant les durées des feux verts dans une intersection isolée à quatre phases. Cet algorithme est basé sur les différentes étapes de résolution proposées ci-dessus pour la résolution d'un tel problème.

Algorithm 1 Modèle de métajeu (MetMod) pour contrôler les feux de signalisation

(S.0) input : $\gamma_i, \mu_i, \omega_i, t_{min,i}, r_i > 0 ; i \in I, T$

(S.1) : Résolution du programme linéaire (3.24) en utilisant la fonction `linprog` implémentée dans Matlab.

(S.2) Output : $t_i, i \in I$.

Toutes les étapes de l'algorithme 1 ont une complexité linéaire à l'exception de l'étape (S.3) qui dépend de la complexité de la méthode du simplexe. D'après [Kasana and Kumar, 2013], la complexité de cette méthode est $O((2^n - 1)(mn))$, où $n = 4$ et $m = 9$ représentent simultanément le nombre de variables et de contraintes du programme linéaire (3.24).

Bien que la complexité de la méthode du simplexe soit exponentielle, mais comme le nombre de contraintes et de variables ne sont pas assez grandes, alors la méthode du simplexe peut facilement résoudre le problème linéaire (3.24) en un temps raisonnable.

Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons adapté le modèle développé dans [Mahiout et al., 2020] pour le contrôle des feux de signalisation de l'intersection du Rameau d'olivier de la ville de Béjaia. Le chapitre suivant donnera les résultats du modèle et les analyses comparatives avec le programmation actuel de ces feux de signalisation.

4

Simulation et résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une application au carrefour du Rameau d'olivier de Béjaia (ROB) du modèle de contrôle des feux de signalisation d'une intersection à quatre phases présenté dans la section 3.2. Nous présenterons les résultats obtenus avec ce modèle et nous les comparerons avec les données recueillies au niveau de ce carrefour. L'algorithme 1 (MetMod) associé à la résolution du modèle a été implémenté sous Matlab. Les données recueillies au niveau du carrefour ont permis de calculer les paramètres d'entrée de l'algorithme. Une analyse comparative des résultats de simulation sera présentée.

4.1 Système de signalisation adopté actuellement au niveau du carrefour (ROB)

Le système de signalisation adopté actuellement au niveau du Rameau d'olivier fonctionne en deux phases. Soit $\rho = \{\rho_1, \rho_2\}$ l'ensemble des phases de l'intersection Rameau d'olivier, voir Figure 4.1.

$$\rho_1 = \{(R_2, R_6); (R_2, R_8); (R_2, R_4); (R_5, R_1); (R_5, R_4); (R_5, R_8)\}.$$

$$\rho_2 = \{(R_3, R_1); (R_3, R_8); (R_3, R_6); (R_7, R_6); (R_7, R_4); (R_7, R_1)\}.$$

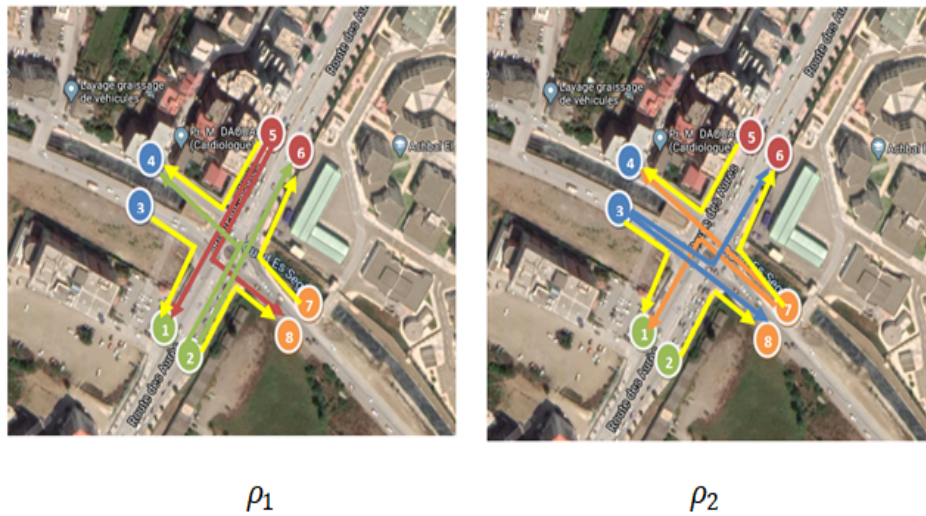


FIGURE 4.1 – Les phases du système adopté actuellement au niveau de l’intersection Rameau d’olivier .

Les quatre mouvements en jaune sont toujours en vert car ces mouvements ne sont pas conflictuels. Comme nous pouvons le constater, les deux phases du système actuel de signalisation comporte des mouvements conflictuels. Par exemple, les deux mouvements (R_2, R_4) et (R_5, R_8) appartenant à la même phase Φ_1 , sont conflictuels. Ces mouvements conflictuels engendrent des interruptions de mouvements et parfois des accidents avec toutes les conséquences sur la congestion, l’insécurité et l’inconfort des usagers, (voir Figure 4.2).

De plus, ces engorgements entre conducteurs provoquent des saturation et congestions de la zone de conflit qui empêchent les véhicules ayant le vert de traverser l’intersection. Parfois les véhicules ayant le vert ne peuvent même pas accéder à la zone de conflit puisque cette dernière est déjà encombrée.



FIGURE 4.2 – Photo réelle qui montre la congestion et la saturation de la zone de conflit.

Le système de feux utilisé actuellement est d'une durée de cycle égale à 140 secondes réparties sur les deux phases comme suit :

Phase ρ_1 : la durée de vert de cette phase est de 98 secondes, tandis que la durée de rouge est de 42 secondes.

Phase ρ_2 : la durée de vert de cette phase est de 42 secondes, tandis que la durée de rouge est de 98 secondes.

4.1.1 Mouvements et fonctionnement du système de signalisation adopté au carrefour (ROB)

Dans cette sous section, nous expliquerons les différentes voies et mouvements de chaque route aboutissant au carrefour du Rameau des Oliviers.

La route des Aurés (véhicules venant de la Zone industrielle) :

La route des Aurés (véhicules venant de la zone industrielle) contient trois voies et chacune dispose de son feu de signalisation. Les usagers empruntant cette voie peuvent suivre l'une des trois directions autorisées (R_2, R_8) , (R_2, R_6) ou (R_2, R_4) . Le feu de la voie se trouvant à droite pour les usagers tournant à droite (mouvement (R_2, R_8)) est toujours en vert, mais ce mouvement est souvent empêché par des véhicules voulant suivre les directions (R_2, R_6) et/ou (R_2, R_4) .

La route des Aurés venant de Naceria :

Cette route contient également trois voies et chacune dispose de son feu de signalisation au niveau du carrefour (ROB). Le feu de la voie se trouvant à droite pour les usagers tournant à droite (usagers voulant prendre la direction (R_5, R_4)) est toujours en vert, mais ce mouvement est souvent empêché par des véhicules voulant suivre les directions (R_5, R_1) et/ou (R_5, R_8) .

La route des résidences universitaires du 17 Octobre 1961 :

La route, venant des résidences universitaires du 17 Octobre 1961, contient trois voies, où les deux voies de gauche possèdent un même feu de signalisation. Le feu de la voie se trouvant à droite pour les usagers tournant à droite (usagers voulant suivre le mouvement (R_3, R_1)) est toujours en vert. Cette voie ne se retrouve presque jamais bloquée grâce à la largeur des voies.

La route Oued Seghir :

Cette route contient deux voies où chaque voie possède son feu de signalisation. Le feu de la voie se trouvant à droite pour les usagers tournant à droite (usagers suivant le mouvement (R_7, R_6)) est toujours en vert. Nous avons constaté que des usagers voulant suivre la direction (R_7, R_1) ou (R_7, R_4) se positionnent sur la voie de droite, empêchant le mouvement des usagers désirant suivre la direction (R_7, R_6) malgré le feu vert.

4.2 Simulation et résultats

Afin de tester et d'évaluer le modèle proposé dans la chapitre 3, nous l'avons implémenté sous l'environnement Matlab. Avant d'exposer les résultats obtenus, nous présenterons les différentes valeurs des paramètres utilisés ainsi que les données collectées sur le terrain.

4.2.1 Choix des paramètres et collecte de données

Les taux de départ et d'arrivée des véhicules aux différentes phases de l'intersection ont été évalués en utilisant les données collectées au niveau du carrefour du Rameau des Oliviers. Pour calculer les taux d'arrivée des véhicules sur les différentes phases de l'intersection, nous avons effectué des comptages à 150m en amont de l'intersection toutes les 140 secondes (un cycle du système actuel). La collecte des données a duré 5 jours (Dimanche, Lundi, Mardi, Mercredi, Jeudi) en mois de Septembre 2020. Chaque jour, nous enregistrons le nombre de véhicules entrant sur une phase pour 20 cycles différents (10 cycles le matin et 10 autres le soir). Nous présenterons ci-après les données numériques enregistrées sous forme de tableaux (voir Table 4.1- 4.5)

Cycle	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_1	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_2	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_3	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_4
Cycle 1	73	37	63	29
Cycle 2	77	38	57	31
Cycle 3	70	41	59	27
Cycle 4	52	48	63	33
Cycle 5	61	53	54	35
Cycle 6	65	39	61	26
Cycle 7	68	42	60	34
Cycle 8	59	47	58	29
Cycle 9	75	51	62	32
Cycle 10	69	49	65	35
Cycle 11	73	63	60	27
Cycle 12	64	52	54	30
Cycle 13	76	67	59	26
Cycle 14	68	56	62	32
Cycle 15	71	62	61	35
Cycle 16	68	62	53	31
Cycle 17	72	59	61	36
Cycle 18	69	53	55	25
Cycle 19	73	61	60	33
Cycle 20	75	63	65	37
Total	1378	1043	1192	623
Moyenne	68.9	52.15	59.6	31.15

TABLE 4.1 – Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 1^{er} jour.

Cycle	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_1	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_2	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_3	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_4
Cycle 1	71	39	58	38
Cycle 2	68	42	54	26
Cycle 3	74	37	62	27
Cycle 4	67	49	64	31
Cycle 5	65	54	56	24
Cycle 6	71	62	63	36
Cycle 7	76	57	59	26
Cycle 8	72	45	52	32
Cycle 9	69	59	61	27
Cycle 10	73	51	59	34
Cycle 11	59	47	46	33
Cycle 12	64	56	45	34
Cycle 13	67	48	38	28
Cycle 14	58	61	44	30
Cycle 15	61	46	42	37
Cycle 16	62	42	45	32
Cycle 17	59	63	39	36
Cycle 18	58	47	42	30
Cycle 19	61	53	37	37
Cycle 20	64	61	45	35
Total	1319	1019	1011	633
Moyenne	65.95	50.95	50.55	31.65

TABLE 4.2 – Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 2^{eme} jour

Cycle	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_1	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_2	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_3	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_4
Cycle 1	47	62	41	27
Cycle 2	44	64	36	34
Cycle 3	39	59	31	31
Cycle 4	53	75	28	28
Cycle 5	67	73	24	25
Cycle 6	47	65	32	28
Cycle 7	58	62	29	37
Cycle 8	48	72	37	29
Cycle 9	52	68	42	17
Cycle 10	62	65	46	26
Cycle 11	66	48	60	25
Cycle 12	72	52	54	27
Cycle 13	63	58	45	21
Cycle 14	59	37	51	32
Cycle 15	75	45	49	37
Cycle 16	66	47	55	22
Cycle 17	68	53	54	28
Cycle 18	56	42	58	34
Cycle 19	54	42	56	29
Cycle 20	77	47	61	31
Total	1173	1136	889	568
Moyenne	58.65	56.80	44.45	28.40

TABLE 4.3 – Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 3^{eme} jour

Cycle	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_1	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_2	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_3	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_4
Cycle 1	69	53	42	25
Cycle 2	72	64	47	28
Cycle 3	65	61	51	32
Cycle 4	54	57	48	36
Cycle 5	61	68	39	24
Cycle 6	69	62	43	29
Cycle 7	73	71	52	31
Cycle 8	67	67	55	34
Cycle 9	64	59	49	30
Cycle 10	56	72	38	26
Cycle 11	61	51	45	29
Cycle 1	65	47	49	33
Cycle 13	72	53	52	28
Cycle 14	69	48	48	32
Cycle 15	71	53	53	35
Cycle 16	75	49	57	32
Cycle 17	69	43	61	36
Cycle 18	64	47	59	27
Cycle 19	61	50	63	33
Cycle 20	74	53	57	36
Total	1331	1128	1008	616
Moyenne	66.55	56.40	50.40	30.80

TABLE 4.4 – Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 4eme jour

Cycle	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_1	Nombre de véhicules entrant sur la phase ϕ_2	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_3	Nombre de véhicules sur la phase ϕ_4
Cycle 1	68	41	46	25
Cycle 2	71	47	43	28
Cycle 3	73	54	52	32
Cycle 4	56	51	57	36
Cycle 5	51	59	63	24
Cycle 6	49	53	58	29
Cycle 7	60	64	60	31
Cycle 8	65	62	59	34
Cycle 9	70	67	51	30
Cycle 10	76	63	46	26
Cycle 11	63	43	48	29
Cycle 1	67	51	55	33
Cycle 13	61	56	52	28
Cycle 14	59	51	49	32
Cycle 15	69	49	51	35
Cycle 16	54	52	57	32
Cycle 17	57	55	63	36
Cycle 18	69	47	47	27
Cycle 19	72	42	52	33
Cycle 20	69	50	55	36
Total	1279	1057	1064	616
Moyenne	63.95	52.85	53.20	30.80

TABLE 4.5 – Nombre de véhicules entrant sur les quatre phases de l'intersection durant le 5^{eme} jour

A partir des données collectées sur le terrain, nous pouvons conclure que les taux d'arrivée et départ des véhicules sur les différentes phases sont :

	Taux moyen d'arrivée/ cycle	Taux d'arrivée des véhicules ($veh.s^{-1}$)
μ_1	32.20	0.46
μ_2	27.30	0.39
μ_3	25.20	0.36
μ_4	14.70	0.21

TABLE 4.6 – Taux d'arrivées moyens des véhicules sur les quatre phases de l'intersection du Rameau d'olivier.

	Taux de départ des véhicules ($veh.s^{-1}$)
ω_1	1.1
ω_2	1.0
ω_3	1.3
ω_4	0.8

TABLE 4.7 – Taux de départ des véhicules sur les quatre phases de l'intersection du Rameau d'olivier.

Le reste des paramètres d'entrée de l'Algorithme 1 ont été fixé comme suit :

$t_{min,1}$	$t_{min,2}$	$t_{min,3}$	$t_{min,4}$	T	r_1	r_2	r_3	r_4
10s	10s	10s	10s	70s	0.25	0.25	0.25	0.25

TABLE 4.8 – Paramètres d'entrée du système de signalisation proposé.

Dans la section suivante, nous présenterons les résultats obtenus après simulation des deux systèmes pendant 06h (21600 secondes) en utilisant les paramètres détaillés ci-dessus.

4.2.2 Interprétation des résultats

Nous commencerons par présenter quelques résultats de l'enquête menée au niveau du carrefour du Rameau d'olivier tels que le système de contrôle des feux signalisation est actuellement programmé. Par la suite, nous utiliserons les données recueillies et les informations déduites sur les taux de départ et d'arrivée des véhicules sur chacune des phases, pour utiliser l'algorithme 1. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus avec cet algorithme. Nous procéderons enfin à la comparaison des résultats entre le système actuel de contrôle des feux de signalisation et les résultats attendus si nous mettons en place le programme obtenu avec le modèle présenté et programmé dans ce mémoire. Le critère de comparaison choisi est le nombre de véhicules restant dans chaque phase à la fin des cycles.

La Figure 4.3 montre l'évolution du nombre moyen de véhicules restant sur les deux phases de l'intersection avec le système actuel. Comme nous pouvons le constater, sur la phase ρ_1 , le nombre moyen de véhicules restant est de 8 à 9 véhicules. Par contre, on remarque que le nombre moyen de véhicules restant sur la phase ρ_2 est de 21 à 22 véhicules.

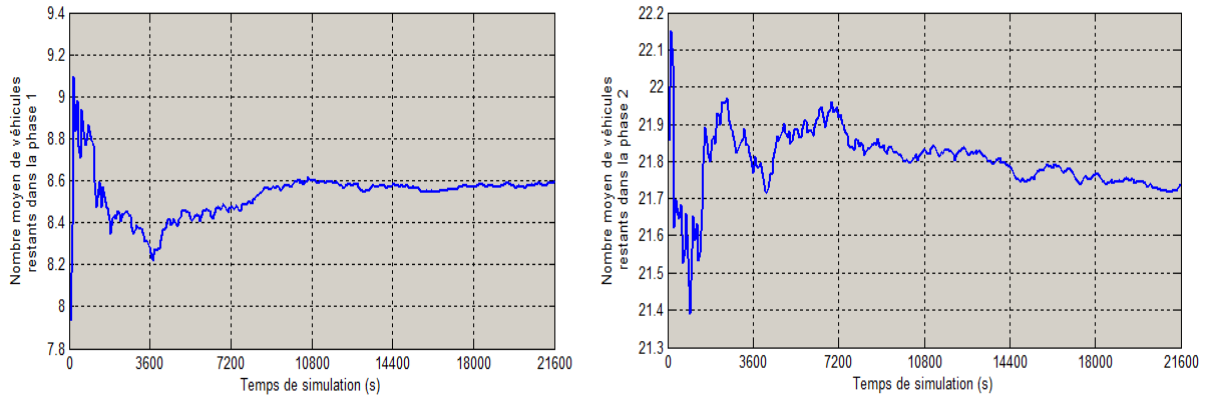


FIGURE 4.3 – Nombre de véhicules restant dans chaque phase du système actuel

Le nombre de véhicules restant dans la phase 1 n'est pas nul car la zone de conflit est souvent encombré ce qui engendre une immobilisation de véhicules juste avant le prochain feu rouge de cette phase.

La Figure 4.4 présente le nombre moyen de véhicules restant dans l'intersection avec le système actuel. On remarque que, le nombre moyen de véhicules restant dans l'intersection augmente de 27 à 30 véhicules durant la première demi heure avant de se stabiliser aux alentours de 30 véhicules tout au long des 6 heures de simulation.

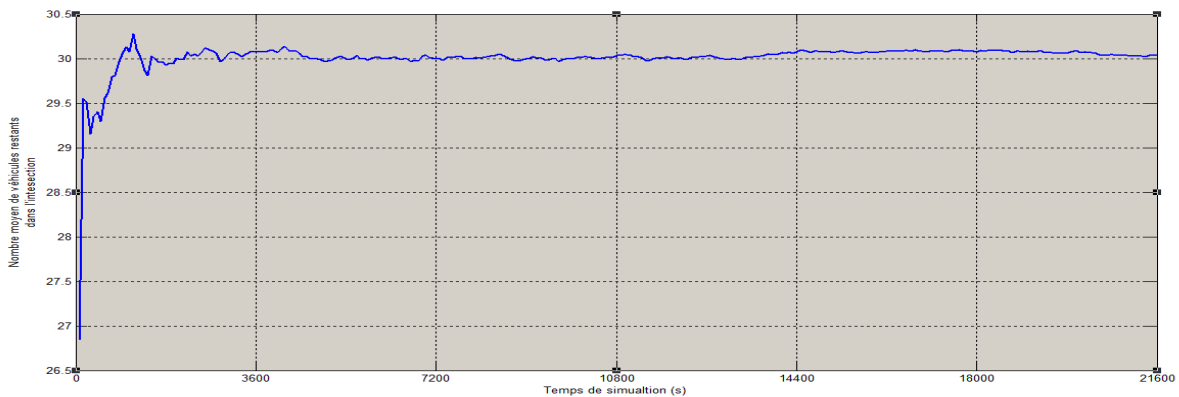


FIGURE 4.4 – Nombre moyen de véhicules restant dans toute l'intersection du système actuel

La Figure 4.5 montre l'évolution du nombre moyen de véhicules restant à la fin du cycle sur les quatre phases du système proposé. On constate que :

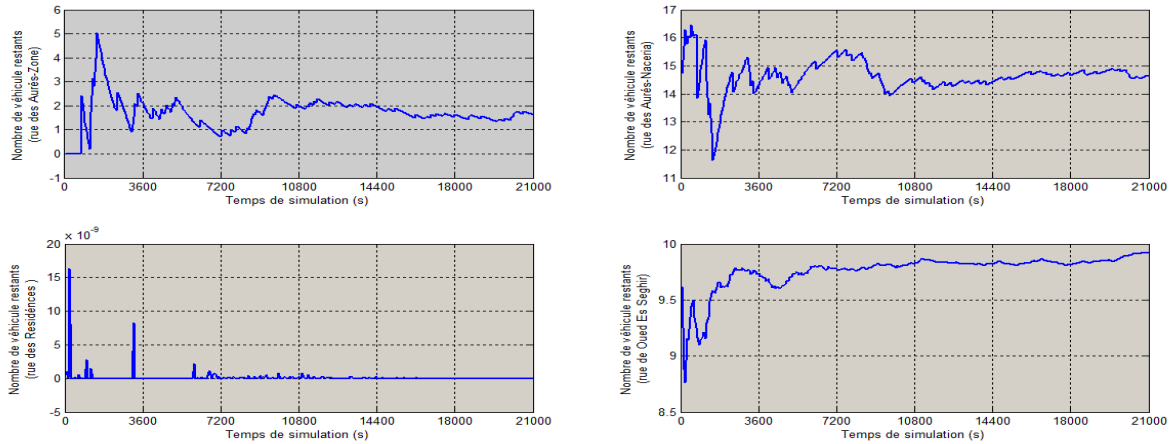


FIGURE 4.5 – Nombre de véhicules restant dans chaque phase de l'intersection du système proposé

- Le nombre moyen de véhicules restant sur la route Oued Seghir à la fin d'un cycle est entre 8 et 10 véhicules.
- Le nombre moyen de véhicules restant sur la route des Aurés-Naceria est entre 12 et 16 véhicules tout au long de la simulation.
- Le nombre moyen de véhicules restant sur la route des Aurés-Zone est entre 1 et 6 véhicules tout au long de la simulation.
- Le nombre moyen de véhicules restant sur la route des Résidences est nul car le taux de départ est très important qui est de 1.3 véhicules/secondes soit 0.43 véhicule/seconde/voie. Le nouveau système permet d'effacer la file d'attente sur la dernière phase qui reçoit le vert.

La Figure 4.6 montre le nombre de véhicules restant dans tout le carrefour (ROB) avec le système proposé. D'après cette Figure, on constate, que le nombre moyen de véhicules restant dans l'intersection varie entre 24 et 27 véhicules, pendant la première heure de simulation avant de se stabiliser aux alentours de 26 véhicules, ce qui est un nombre très réduit malgré le découpage en quatre phases.

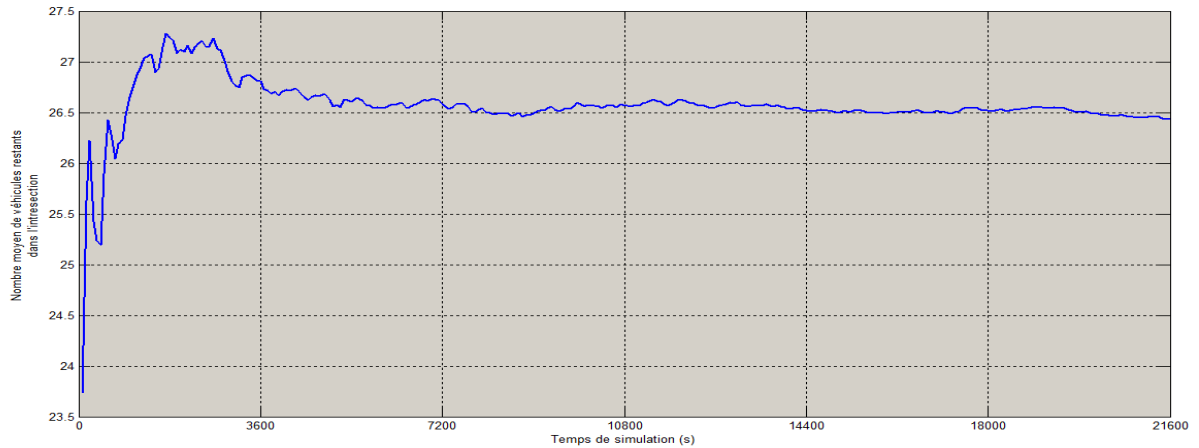


FIGURE 4.6 – Nombre de véhicules restant dans l'intersection du système proposé

La Figure 4.7 montre les variations des durées des feux verts de chaque phase de l'intersection selon le système proposé.

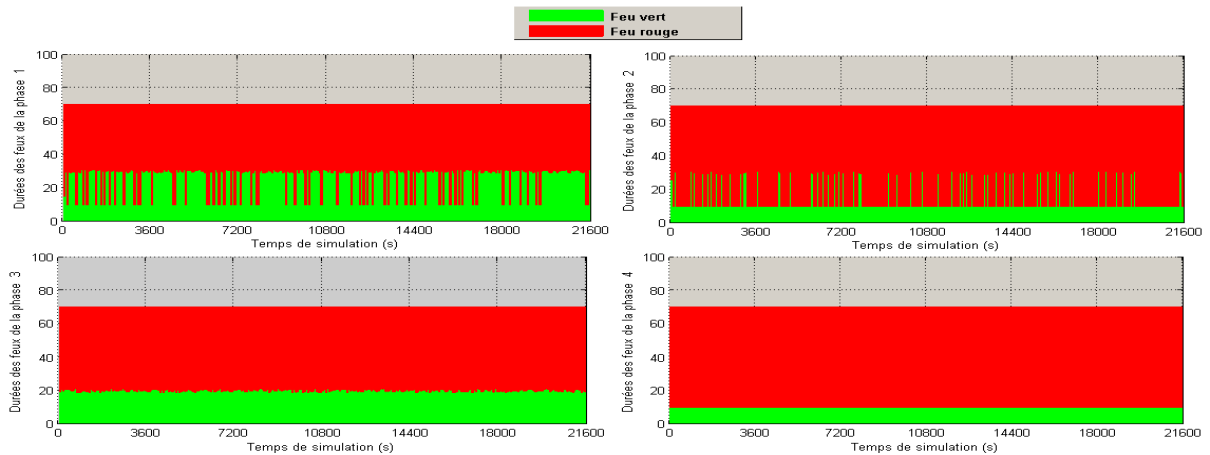


FIGURE 4.7 – Variations des durées des feux verts de chaque phase de l'intersection

D'après la Figure 4.7, on constate que :

- La durée de feu vert de la route principale des Aurés en venant de la Zone industrielle (phase (ϕ_1)) prend comme valeur le plus souvent 30s et 10s de temps à autre.
- La durée de feu vert de la route principale des Aurés en venant de Nacéria (phase (ϕ_2)) prend le plus souvent 10 s et 30s de temps à autre .
- La durée de feu vert de la route des résidences (phase (ϕ_3)) prend valeur entre 18 et 21 secondes.

- La durée de feu vert de la route Oued Seghir (phase (ϕ_4)) est assez stable et ceci s'explique par la stabilité du nombre de véhicules entrants et sortants.

La Figure 4.8 illustre les résultats de comparaison des deux systèmes en terme du nombre moyen de véhicules restant sur l'ensemble des voies de l'intersection.

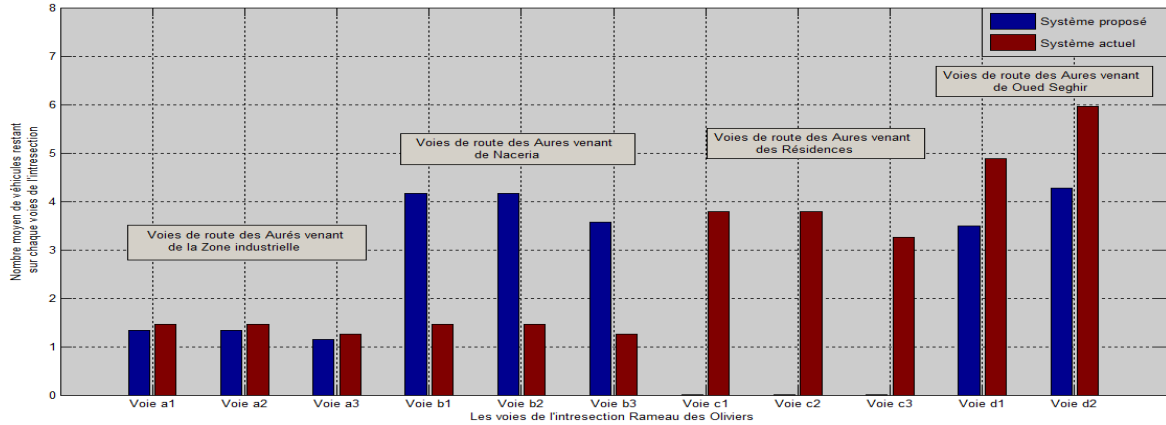


FIGURE 4.8 – Nombre de véhicules restant sur chaque voie de l'intersection Rameau d'olivier

Comme nous pouvons le constater, le nouveau système est plus performant sur l'ensemble des voies à l'exception des voies b1, b2 et b3. Sur les voies a1, a2, a3, d1 et d2 on constate une légère amélioration. Mais au niveau des voies c1, c2 et c3 le nouveau système est beaucoup plus performant que le système actuel.

La Figure 4.9 montre l'évolution du nombre moyen de véhicules restant sur l'ensemble de l'intersection. On constate une nette amélioration du nombre moyen de véhicules en attente dans l'intersection avec notre système. Durant la première heure de simulation, la courbe du système proposé augmente de 25 à 27 véhicules mais n'atteint jamais la valeur minimale de la courbe du système actuel qui est de 28 véhicules. Après une heure de simulation (3600 secondes), la courbe du système actuel se stabilise aux alentours de 30 véhicules et la courbe du système proposé se stabilise aux alentours de 26 véhicules. Nous pouvons conclure que le système proposé est plus performant. En plus de ces résultats, avec le système proposé les véhicules peuvent traverser l'intersection sans aucun conflit.

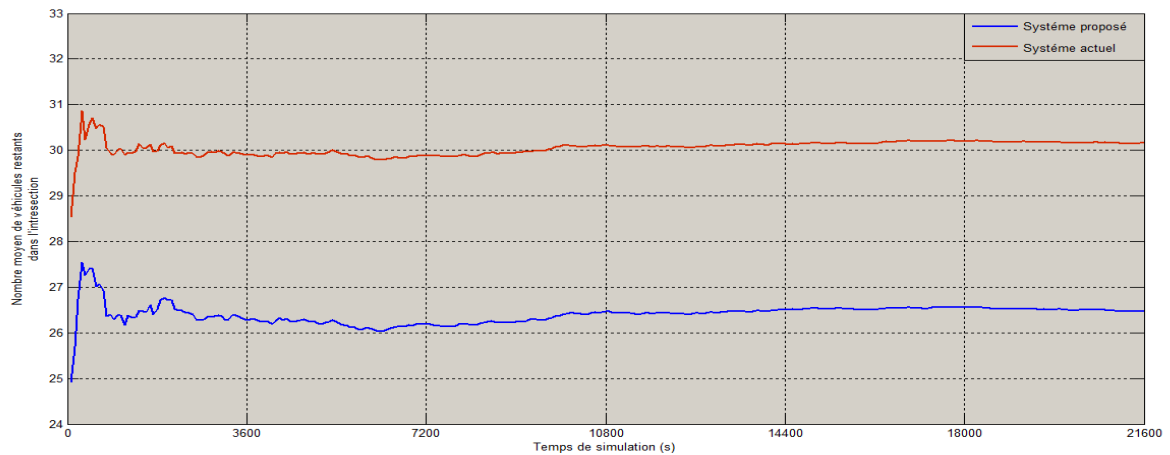


FIGURE 4.9 – Nombre de véhicules restants dans l'intersection Rameau d'olivier dans les deux systèmes

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit, en premier lieu, le système de signalisation utilisé actuellement au niveau de l'intersection du Rameau d'olivier. Par la suite, nous avons comparé et interprété les résultats obtenus avec le système proposé en comparaison avec ceux obtenus avec le système actuel. Enfin, d'après ces résultats, nous pouvons constater que le nouveau système est plus performant et il permet de réduire la congestion et améliorer la fluidité au niveau de l'intersection.

Conclusion générale et perspectives

Ce mémoire étudie le problème de la régulation des feux de signalisation au niveau de l'intersection du Rameau des Oliviers de Béjaia. Actuellement, cette intersection est gérée par un plan de feu fixe qui fonctionne en deux phases. Plusieurs insuffisances sont relevées dans la programmation actuelle des feux de signalisation, qui autorisent des mouvements conflictuels à des usagers, ce qui engendrent des situations de blocages au niveau des zones dites de conflit, et par conséquent, des congestions et des perturbations du trafic routier. Pour remédier, nous avons proposé d'adapter un nouveau plan de feux qui fonctionne en quatre phases afin d'éviter tout conflit entre les usagers de l'intersection. De plus, ce nouveau modèle permet de calculer les durées de vert en fonction de la demande du trafic des différentes phases de l'intersection cycle par cycle.

Nous avons proposé de calculer les durées de vert des quatre phases de l'intersection en se basant sur le modèle de jeu non-coopératif avec contraintes développé dans [Mahiout et al., 2020]. Dans ce modèle, les joueurs représentent les phases de l'intersection. Chaque phase vise à augmenter son feu vert afin de minimiser la longueur de la file d'attente des véhicules sur les voies associées à la phase représentée. Par la suite, le modèle de jeu est transformé en un problème d'optimisation linéaire. Enfin, le vecteur de solution représentant les durées de vert des quatre phases est calculé en se basant sur la méthode de simplexe.

Les résultats obtenus après la comparaison du nombre moyen de véhicules restant sur les voies selon les deux systèmes et ainsi le nombre moyen de véhicules restants dans toute l'intersection. Le système proposé est plus performant que le système adopté actuellement car les durées des feux verts s'adaptent parfaitement à la demande et les files d'attentes se forment dans chaque fin de cycle sont d'une taille inférieure à celles du système actuel. De plus, la répartition des cycles en quatre phases fait éviter les mouvements conflictuels observés actuellement causant des arrêts de circulation et parfois des accidents.

Les perspectives de développement les plus prometteuses sont considérées ci-dessous.

- Appliquer le système proposé dans [Mahiout et al., 2020] au niveau de l'intersection Rameau des Oliviers et étendre l'étude menée dans ce mémoire aux autres intersections du réseau urbain de la ville de Béjaia, fortement congestionné notamment pendant la saison estivale.
- Étudier le problème de contrôle des feux de signalisation à l'échelle d'un réseau d'intersection (réseau d'intersection de la ville de Béjaia).

Bibliographie

- [Alexis, 2003] Alexis, C. (2003). Mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux : application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour. Thèse de doctorat en informatique, spécialité : Automatique et informatique des systèmes industriels et humains. Université de valenciennes et du hainaut-cambrésis, 12 Décembre.
- [Aubin, 2013] Aubin, J.-P. (2013). *Optima and equilibria : an introduction to nonlinear analysis*, volume 140. Springer Science & Business Media.
- [Barache, 2007] Barache, F. (2007). Sur la théorie des jeux évolutionnaires et ses applications en économie, Mémoire de magistère en mathématiques appliquées. Université abderrahmane mira de béjaia.
- [Belakbir, 2011] Belakbir, N. (2011). Application de la théorie des jeux dans les réseaux de télécommunications, Mémoire de magistère en mathématiques appliquées. Université abderrahmane mira de béjaia.
- [Braban and Boillot, 2003] Braban, C. and Boillot, F. (2003). *Les systemes temps réel de commande de feux en milieu urbain*. INRETS.
- [Bui et al., 2017] Bui, K.-H. N., Jung, J. E., and Camacho, D. (2017). Game theoretic approach on real-time decision making for iot-based traffic light control. *Concurrency and Computation : Practice and Experience*, 29(11) :e4077.
- [Bui and Jung, 2018] Bui, K.-H. N. and Jung, J. J. (2018). Cooperative game-theoretic approach to traffic flow optimization for multiple intersections. *Computers & Electrical Engineering*, 71 :1012–1024.
- [Debreu, 1952] Debreu, G. (1952). A social equilibrium existence theorem. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38(10) :886–893.
- [Dreves, 2017] Dreves, A. (2017). Computing all solutions of linear generalized nash equilibrium problems. *Mathematical Methods of Operations Research*, 85(2) :207–221.
- [Dreves and Sudermann-Merx, 2016] Dreves, A. and Sudermann-Merx, N. (2016). Solving linear generalized nash equilibrium problems numerically. *Optimization Methods and Software*, 31(5) :1036–1063.
- [Florent, 2015] Florent, P. (2015). *Régulation Coopérative Des Intersections : Protocoles et Politiques*. PhD thesis, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [Gaciarz, 2016] Gaciarz, M. (2016). *Régulation de trafic urbain multimodal : une modélisation multi-agents*. PhD thesis.
- [Henry et al., 1984] Henry, J.-J., Farges, J. L., and Tuffal, J. (1984). The prodyn real time traffic algorithm. In *Control in Transportation Systems*, pages 305–310. Elsevier.
- [Hunt et al., 1982] Hunt, P., Robertson, D., Bretherton, R., and Royle, M. C. (1982). The scoot on-line traffic signal optimisation technique. *Traffic Engineering & Control*, 23(4).

- [Idjeraoui et al., 2019] Idjeraoui, O., Boutaba, H., and Mili, M. (2019). Problématique de la mobilité urbaine dans les villes algériennes. cas de la congestion routière à bejaia. *Analale Universitatii Bucuresti. Seria Geografie*.
- [Kasana and Kumar, 2013] Kasana, H. S. and Kumar, K. D. (2013). *Introductory operations research : theory and applications*. Springer science & business media.
- [Laurant, 2001] Laurant, M. (2001). *Commande Optimale Décentralisée Du Trafic Urbain*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure De l’Aéronautique Et De l’Espace.
- [Lowrie, 1982] Lowrie, P. (1982). Scats : The sydney co-ordinated adaptive traffic system-principles, methodology, algorithms. *Proceedings of the IEE International Conference on Road Traffic Signalling*, pages 67–70.
- [Mahiout et al., 2020] Mahiout, H., Radjef, M. S., and Farhi, N. (article en révision, 2020). Regulation of urban traffic lights at an isolated junction using game theory approach.
- [Mauro and Di Taranto, 1990] Mauro, V. and Di Taranto, C. (1990). Utopia. *IFAC Proceedings Volumes*, 23(2) :245–252.
- [Onana and Guideke, 2019] Onana, M. R. V. M. and Guideke, B. R. (2019). Etude et simulation des feux de circulation cas du carrefour poste central de yaounde cameroun. Laboratoire du génie électrique mecatronique et traitement du signal.
- [RADJEF, 2015] RADJEF, M. S. (2014,2015). Cours de la théorie des jeux.
- [Robertson, 1969] Robertson, D. I. (1969). Transyt : a traffic network study tool.
- [Rosen, 1965] Rosen, J. B. (1965). Existence and uniqueness of equilibrium points for concave n-person games. *Econometrica : Journal of the Econometric Society*, pages 520–534.
- [SAIT, 2008] SAIT, R. (2008). Application de la théorie des jeux dans l’organisation industrielle, Mémoire de magistère en mathématiques appliquées. Université abderrahmane mira de béjaia.
- [Villalobos et al., 2008] Villalobos, I. A., Poznyak, A. S., and Tamayo, A. M. (2008). Urban traffic control problem : a game theory approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 41(2) :7154–7159.
- [Webster, 1958] Webster, F. V. (1958). Traffic signal settings. Technical report.
- [Yang and A.Rakha, 2016] Yang, H. M. H. and A.Rakha, H. (2016). Isolated traffic signal control using nash bargaining optimization. *IFAC Proceedings Volumes*, 16.

Résumé

Ce travail est consacré à l'application de la théorie des jeux dans le domaine de la régulation des feux de signalisation. En particulier, notre objectif est d'améliorer l'efficacité des feux de signalisation au niveau de l'intersection du Rameau des Oliviers et résoudre les problèmes rencontrés avec le système actuel. Le système proposé dans ce travail permet, d'une part, d'éviter les mouvements conflictuels et, d'autre part, de programmer les durées des feux vert de manière à réduire les temps d'attente (durée des feux rouges) des usagers à l'intersection. Les résultats obtenus montrent l'efficacité du modèle proposé en comparaison avec ceux du système actuellement utilisé.

Mots clés : Carrefour du Rameau des Oliviers, Béjaia, contrôle, feux de signalisation, théorie des jeux.

Abstract

This work is devoted to the application of game theory in the field of traffic light regulation. In particular, our objective is to improve the efficiency of the traffic lights at the intersection of the Olive Branch and to solve the problems encountered with the current system. The system proposed in this work makes it possible, on the one hand, to avoid conflicting movements and, on the other hand, to program the durations of green lights so as to reduce waiting times (duration of red lights) for users at the intersection. The obtained results show the efficiency of the proposed model in comparison with those of the system currently in use.

Keywords : Crossroads of the Olive Branch, Béjaia, control, traffic lights, game theory.