



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département d'Informatique

Mémoire de master

en Informatique

Spécialité : ISIL

Thème

Feux Tricolores Intelligents pour les Villes
Intelligentes

Encadreur

— Mr AMAD Mourad

Réalisé par

— HADJ RABAH Sabrina

— NOUARI Djahida

2018/2019

Remerciements

Nous remercions d'abord le bon Dieu qui nous a aidé et qui nous a donné le courage et la patience pour réaliser ce modeste travail.

*Nos profondes gratitudee et sincères remerciements vont à notre promoteur **Docteur AMAD Mourad** de nous avoir encadrer, pour son suivi et son orientation. Nous tenons également, à lui nos profondes reconnaissances pour le temps précieux qu'il nous a consacré, ses remarques pertinentes et précieuses, ses conseils et ses encouragements.*

*Nos remerciements s'étendent également au **Professeur BENNOUAR Djamel** Chef de département ainsi qu'à tous nos professeurs et examinateurs de département informatique pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.*

Nos remerciements vont aussi aux membres de jury pour avoir accepté de juger ce modeste travail.

On n'oublie pas nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience. Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenue et encouragées au cours de la réalisation de ce travail.

Merci à tous et à toutes.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

La mémoire de mon cher Père paix à son âme

Ma très chère mère

Mes frères et Mes sœurs

Tous ceux j'aime et ceux qui m'aiment.

HADJ RABAH Sabrina

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

Mes très chers parents

Mes grandes mères et grands pères

Mon adorable frère

Tous ceux j'aime et ceux qui m'aiment.

NOUARI Djahida

Résumé

Les systèmes de feux de circulation jouent un rôle crucial dans la gestion de la circulation. Lorsque les réseaux routiers sont organisés efficacement, ils peuvent faciliter grandement les déplacements. Cependant, dans des configurations mal gérées, les feux de circulation ne servent finalement qu'à énerver des conducteurs bloqués derrière leur volant et derrière un feu rouge. Le tout sur une route déserte. Mais aussi provoquer d'énormes embouteillages.

L'objectif principal de notre travail est de proposer une nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores intelligents. Une telle solution doit répondre à un certain nombre de besoins entre autres, elle sera optimisée, l'intervalle de temps du signal de circulation dépend uniquement du nombre de véhicules sur la route. Le principal avantage de ce système est qu'il peut réduire le temps d'attente des conducteurs pour traverser le signal et réduire l'encombrement routier et le temps de déplacement des usagers, améliorer la sécurité routière en réduisant les accidents routiers. Sans oublier deux facteurs importants qui consistent à diminuer le stress et provoquer une économie globale d'énergie.

Mots clés : Internet des objets, ville intelligente, feux tricolores, système de transport intelligent

Abstract

Traffic light systems play a crucial role in traffic management. When road networks are organized effectively, they can greatly facilitate travel. However, in poorly managed configurations, the traffic lights serve only to annoy drivers stuck behind their steering wheel and behind a red light. All on a deserted road. But also cause huge traffic jams.

The main objective of our work is to propose a new solution for the dynamic management of intelligent traffic lights. Such a solution must meet a number of needs among others, it will be optimized, the time interval of the traffic signal depends solely on the number of vehicles on the road. The main advantage of this system is that it can reduce the waiting time for drivers to cross the signal and reduce congestion and travel time of users, improve road safety by reducing road accidents. Not to mention two important factors that consist of reducing stress and causing a global energy saving.

Key words : Internet of things, smart city, traffic lights, intelligent transportation system

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des tableaux	vi
Liste des abréviations	vii
Introduction	1
1 Généralités sur l'internet des objets et les villes intelligentes	4
1.1 Introduction	4
1.2 Internet des objets (<i>IdO</i>)	5
1.2.1 Définition d'objet connecté (<i>OC</i>)	5
1.2.2 Définition d'internet des objets (<i>IdO</i>)	5
1.2.3 Domaines d'application	6
1.2.4 Évolution de l'écosystème de l'internet des objets	8
1.2.5 Architecture de l'internet des objets	9
1.2.6 Avantages d'internet des objets	10
1.3 Villes intelligentes	11
1.3.1 Quelques définitions des villes intelligentes	11
1.3.2 Composantes de la ville intelligente	11
1.3.3 Quatre risques importants pour les villes intelligentes	15
1.3.4 Top 5 des villes intelligentes et durables dans le monde	16

1.4	Quelques usages clés des technologies internet des objets pour la ville intelligente	18
1.5	Avantages et applications d'internet des objets aux villes intelligentes . . .	19
1.6	Conclusion	19
2	État de l'art sur la gestion des feux tricolores	20
2.1	Introduction	20
2.2	Définition des feux de circulation tricolores	20
2.3	Terminologie	21
2.4	Histoire et l'évolution des feux de circulation	22
2.5	Domaines d'emploi	23
2.6	Systèmes existants de gestion des feux tricolores	23
2.6.1	<i>TRANSYT</i>	23
2.6.2	<i>SCOOT</i>	24
2.6.3	<i>SCATS</i>	25
2.6.4	<i>PRODYN</i>	26
2.7	Limites des approches étudiées	26
2.8	Outils théoriques de la gestion de trafic routier	27
2.8.1	Contrôle par la logique floue	27
2.8.2	Algorithmes génétiques	28
2.8.3	Réseaux de neurones	28
2.8.4	Théorie des files d'attente	29
2.9	Systèmes de transport intelligents	30
2.10	Algorithmes de plus court chemin dans le domaine du transport	31
2.11	Inconvénients des feux tricolores	31
2.12	Conclusion	32
3	Nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores	33
3.1	Introduction	33
3.2	Gestion intelligente du trafic	34
3.3	Modélisation du trafic routier urbain	34
3.4	Relation demande vitesse-débit	36
3.5	Impact d'encombrement sur le temps	37

3.6	Approche proposée	38
3.6.1	Démarche à suivre	39
3.7	Architecture de réseau routier proposé	40
3.7.1	Communication véhicule-à-infrastructure (<i>V2I</i>)	41
3.7.2	Communication entre les intersections	42
3.7.3	Algorithme de Dijkstra	42
3.7.4	Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores	46
3.8	Déroulement des algorithmes	49
3.8.1	Algorithme de Dijkstra	49
3.8.2	Exemple d'application d'un algorithme de gestion dynamique des feux tricolores	54
3.9	Conclusion	55
4	Évaluation des performances de la solution proposée	56
4.1	Introduction	56
4.2	Langage et environnement utilisé	56
4.2.1	Langage Java	56
4.2.2	Pourquoi Java?	57
4.2.3	Environnement d'exécution	57
4.2.4	Packages utilisés	58
4.3	Tests et Résultats	58
4.4	Conclusion	67
	Conclusion générale et perspectives	68
	Bibliographie	70

Table des figures

1.1	Domaines d'application	8
1.2	Évolution d'IdO entre 2003 et 2020.	9
1.3	Architecture d'internet des objets.	10
1.4	Schéma des six leviers d'une ville intelligente (Inspiré de : [12])	12
1.5	Smart City wheel (Tiré de : [13]).	13
1.6	Synthèse des six dimensions pour devenir une ville intelligente.	14
2.1	Architecture de <i>TRANSYT</i>	24
2.2	Principes généraux de <i>SCATS</i>	26
3.1	Intersection à quatre branches avec mouvement tourne à gauche, à priorité à droite.	36
3.2	Débit en fonction de la demande (<i>Nombre de véhicules pour une période donnée</i>).	37
3.3	Vitesse en fonction de la demande.	38
3.4	Temps en fonction de taux d'encombrement et vitesse.	38
3.5	Réseau routier proposé.	41
3.6	Communication V2I.	41
3.7	Illustration des feux tricolores et des contrôleurs	47
3.8	Graphe pondéré pour le réseau routier	53
3.9	Déroulement d'algorithme de Dijkstra appliqué sur réseau routier de la figure 3.8	53
3.10	Gestion dynamique des feux tricolores appliquée dans l'intersection <i>A</i>	55

4.1	Feux tricolores classiques.	59
4.2	Interface de nombre des véhicules.	60
4.3	Communication <i>V2I</i>	61
4.4	Communication infrastructure à infrastructure	62
4.5	Capacité de tronçon saturée.	63
4.6	Calcul de taux et durée pour chaque tronçon	64
4.7	Durée et le plus court chemin du point D aux autres points.	65
4.8	Relation entre le taux d'encombrement et la durée de déplacement.	65
4.9	Meilleur chemin de D à F.	66
4.10	Feux tricolores intelligents	67

Liste des tableaux

- 3.1 Tableau des vocabulaires 44
- 3.2 Tableau de notations pour l'algorithme des feux tricolores. 46
- 3.3 Tableau de notations 50
- 3.4 Évaluation du durée en fonction de taux d'encombrement (1). 51
- 3.5 Évaluation du durée en fonction de taux d'encombrement (2) 52

- 4.1 Tableau des packages java utilisés. 58

Liste des abréviations

ADN	Acide D éoxyribo N ucléique
API	A pplication P rogramming I nterface
ATIS	A dvanced T raveler I nformation S ystem
CERP-IdO	C luster des projets E uropéens de R echerche sur l' I nternet des O bjets
CERT	C entre d' E tude et de R echerche de T oulouse
IAB	I nternet A rchitecture B oard
I.B.M	I nternational B usiness M achines
IBSG	I nternet B usiness S olution G roups
IdO	I nternet des O bjets
IEEE	I nstitut of E lectrical and E lectronic E ngineer
IEEE-SA	I EEE S tandards A ssociation
LEED	L eadership in E nergy and E nvironmental D esign
M2M	M achine to M achine
MIT	M assachussetts I nstitute of T echnology
OC	O bjet C onnecté
OCE	O bjet C onnecté E nrichi
P&G	P rocter G amble
PRODYN	P ROgrammation D YNamique
RFC	R equests F or C omments
SCATS	S ydney C o-ordinated A daptative T raffic S ystem
SCOOT	S plit C ycle O ffset O ptimization T echnique
SIAD	S ystème d' I nformation d' A ide au D éplacement
STI	S ystème de T ransport I ntelligent

TIC	T echnologies d' I nformation et de C ommunicatio
TRANSYT	T R A fic N etwork S tud Y T ool
TRL	T rafic R esearch L aboratory
TRRL	T ransport and R oad R esearch L aboratory
WSW	W ebSphere S tudio W orkbench

Introduction générale

Si de nombreux aspects de notre vie sont devenus plus agréables grâce à l'utilisation de technologies avancées, le secteur du transport par contre a mis un temps assez long pour pouvoir combler son retard. Aujourd'hui, ces progrès sont devenus incontournables. Les véhicules deviennent de plus en plus sûrs, mais en contrepartie l'environnement routier est devenu plus complexe, ceci est dû principalement à l'accroissement rapide du nombre de véhicules et les conséquences qui en résultent.

La croissance de la population et l'augmentation du nombre d'utilisateurs sur les routes constituent une source considérable de problèmes divers. Les impacts sont à la fois environnementaux et de santé publique. Ils sont causés par les rejets de gaz à effet de serre et les émissions de polluants par les véhicules, suite à l'apparition de congestions accrues et de phénomènes d'accordéon récurrents. Les conséquences économiques liées à la consommation de carburant et au temps perdu dans les embouteillages ne sont pas en reste. Rajouté à cela des incidents et accidents sont provoqués par la dégradation des conditions de circulation. Tout ceci constitue un enjeu sociétal important.

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

Des feux de circulation ont été mis en place pour gérer les flux de trafic mais de-

viennent de plus en plus inefficace en raison de leur conception. Le minutage prédéfini varie entre le vert, les tons orange et rouge, sans tenir compte des conditions actuelles, entraînent notamment une augmentation des temps d'attente, utilisation de carburant supplémentaire et pollution de l'air. En outre, le manque d'équipement capable de fournir aux automobilistes les informations sur les conditions de la route prédominantes augmente encore la possibilité d'être coincé dans la circulation.

Des progrès importants ont été accomplis ces dernières années en matière d'amélioration de la gestion routière dans les villes, de nouvelles stratégies restent néanmoins à mettre en œuvre pour résoudre le problème de la congestion.

Pour mieux répondre aux besoins de la gestion routière, il est nécessaire de mettre en place des systèmes de transports plus efficaces, économes et durables. Le développement de systèmes de transport intelligents permet de mieux appréhender la dynamique du trafic à travers les dispositifs de régulation du trafic. Le système de transport intelligent (*STI*) améliore la communication de véhicule à infrastructure et infrastructure à infrastructure pour améliorer les infrastructures routières plutôt que d'augmenter la capacité des routes ou d'aménager de nouvelles routes. Cela est possible grâce aux *STI*, qui utilisent des informations et des communications avancées. Ces communications contribueront à réduire les embouteillages et les accidents de la route, ce qui est dangereux dans les zones urbaines.

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés à l'étude et la résolution de problèmes d'optimisation de feux tricolores. Le problème fondamental est la gestion de la synchronisation des signaux de circulation, de déterminer le plus court chemin à effectuer entre deux points pour réduire le temps de déplacement et éviter l'encombrement en même temps.

Ce mémoire est organisée en quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre : nous donnons en premier les notions de base de l'internet des objets et les villes intelligentes. Puis nous représentons quelques usages et avantages de l'internet des objets pour la ville intelligente.
- Dans le deuxième chapitre : nous donnons en premier les notions de base de feux tricolores, l'histoire et l'évolution des feux de circulation ainsi que nous allons

présenter quelques travaux existants pour cette gestion, quelques inconvénients de ces systèmes de gestion de transport intelligents.

- Dans le troisième chapitre : nous proposons une nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores intelligents.
- Dans le dernier chapitre : nous présentons les implémentations et les expérimentations réalisées pour valider la solution présentée dans le troisième chapitre.

Enfin, on conclut et on termine par des perspectives que l'on souhaite réaliser dans le futur.

Généralités sur l'internet des objets et les villes intelligentes

1.1 Introduction

Internet est un réseau informatique mondial, qui se transforme progressivement en un réseau étendu dit Internet des Objets (*IdO*), reliant des milliards d'êtres humains et des dizaines de milliards d'objets.

Le modèle émergent de l'internet des objets (*IdO*) est essentiel au développement des villes intelligentes. L'architecture intégrée des réseaux, des logiciels, des capteurs, des interfaces humaines et des outils d'analyse de données orientés sur le cloud est essentielle à la création de valeur. Les produits connectés intelligents de l'*IdO* et les services qu'ils fournissent deviendront essentiels pour le développement futur des villes intelligentes.

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord l'*IdO*, sa définition, les domaines d'application, évolution de l'écosystème d'*IdO*, son architecture et quelques enjeux et défis. Puis nous consacrons à la représentation de villes intelligentes, ses composantes et le top 5 de villes intelligentes et durables dans le monde. Ensuite, nous donnons quelques usages des technologies *IdO* pour la ville intelligente. Enfin nous résumons les avantages d'*IdO* aux villes intelligentes.

1.2 Internet des objets (*IdO*)

1.2.1 Définition d'objet connecté (*OC*)

Avant de définir les concepts d'*IdO*, il est important de définir l'objet connecté qui est un dispositif dont la finalité première n'est pas d'être un système informatique ni une interface d'accès au web, exemple, un objet tel qu'une machine à café ou une serrure était conçue sans intégration de systèmes informatiques ni connexion à internet. L'intégration d'une connexion internet à un objet connecté (*OC*) permet de l'enrichir en terme de fonctionnalités, d'interaction avec son environnement, il devient un *OC Enrichi (OCE)*, par exemple, l'intégration d'une connexion internet à la machine à café la rendant accessible à distance.

Un *OC* peut interagir avec le monde physique de manière indépendante sans intervention humaine [1]. Il possède plusieurs contraintes telles que la mémoire, la bande passante ou la consommation d'énergie, etc. Il doit être adopté à un usage, il a une certaine forme d'intelligence, une capacité de recevoir, de transmettre des données avec des logiciels grâce aux capteurs embarqués. Un objet connecté a une valeur lorsqu'il est connecté à d'autres objets et briques logicielles, par exemple : une montre connectée n'a d'intérêt qu'au sein d'un écosystème orienté santé bien-être, qui va bien au-delà de connaître l'heure.

Un *OC* à trois éléments clés :

1. Les données produites ou reçues, stockées ou transmises.
2. Les algorithmes pour traiter ces données.
3. L'écosystème dans lequel il va réagir et s'intégrer.

1.2.2 Définition d'internet des objets (*IdO*)

Kevin Ahston, le cofondateur de l'Auto-ID Center¹ du *MIT* a employé le terme "Internet Of Things (*Internet des Objets*)" en 1999. *IdO* a été prononcé dans le cadre d'une présentation pour l'entreprise Procter & Gamble (*P & G*). Ce terme concerne le monde d'objets, d'appareils et de capteurs qui sont inter-connectés par internet [2].

1. Auto-ID Center : est une organisation de recherche mondiale à but non lucratif basée au Massachusetts Institute of Technology. Fondé en 1999, le Centre a été créé pour répondre à la vision du Universal Code Council de créer le code à barres de la prochaine génération.

Le *CERP-IdO* (*Cluster des Projets Européens de Recherche sur l'Internet des Objets*) définit l'internet des objets comme : « *une infrastructure dynamique d'un réseau global. Ce réseau global a des capacités d'auto-configuration basée sur des standards et des protocoles de communication interopérables. Dans ce réseau, les objets physiques et virtuels ont des identités, des attributs physiques, des personnalités virtuelles et des interfaces intelligentes, et ils sont intégrés au réseau d'une façon transparente* » [3].

Cette définition montre les deux aspects de l'*IdO* : temporel et spatial qui permettent aux personnes de se connecter de n'importe où à n'importe quel moment à travers des objets connectés (*smartphone, tablettes, capteurs, caméras de vidéo-surveillance, etc*). L'internet des objets doit être pensé pour un usage facile et une manipulation sécurisée pour éviter des menaces et risques potentiels, tout en masquant la complexité technologique sous-jacente [4].

1.2.3 Domaines d'application

L'*IdO* couvrira un large éventail d'applications (*comme illustré dans la Figure 1.1*) et touchera quasiment à tous les domaines que nous affrontons au quotidien. Ceci permettra l'émergence d'espaces intelligents autour d'une informatique omniprésente. Parmi ces espaces intelligents, on peut citer [5] :

- **L'énergie** : la gestion des grilles électriques se verra améliorée grâce à la télémétrie, permettant une gestion en temps réel de l'infrastructure de distribution de l'énergie. Cette interconnexion à large échelle facilitera la maintenance et le contrôle de la consommation et la détection des fraudes.
- **Le transport** : dans ce domaine l'*IdO* appuiera les efforts actuels autour des véhicules intelligents au service de la sécurité routière et l'aide à la conduite. Cela portera sur la communication inter-véhicule et entre véhicules et infrastructure routière. L'*IdO* constituera ainsi un prolongement naturel des "systèmes de transport intelligents" et leurs apports en termes de sécurité routière, confort, efficacité de la gestion du trafic et économie du temps et de l'énergie.
- **Les villes** : l'*IdO* permettra une meilleure gestion des réseaux divers qui alimentent nos villes (*eaux, électricité, gaz, etc.*) en permettant un contrôle continu en temps réel et précis. Des capteurs peuvent être utilisés pour améliorer la gestion des parkings et du trafic urbain et diminuer les embouteillages et les émissions en

CO₂.

- **L'agriculture** : dans ce domaine, des réseaux de capteurs inter-connectés à l'*IdO* peuvent être utilisés pour la supervision de l'environnement de culture. Ceci permettra une meilleure aide à la décision en agriculture, notamment pour optimiser l'eau d'irrigation, l'usage des intrants, et la planification de travaux agricoles. Ces réseaux peuvent être aussi utilisés pour lutter contre la pollution de l'air, du sol et des eaux et améliorer la qualité de l'environnement en général.
- **La santé** : la normalisation de l'internet des objets dans le domaine de la Santé va permettre de créer de nouveaux modèles de fonctionnement qui augmenteront la productivité des employés, mais aussi la collaboration entre soignants ainsi que la communication avec les patients.

Les objets connectés sont utilisés au quotidien pour :

- la surveillance au sein des établissements médicaux et la maintenance,
 - les opérations chirurgicales et le contrôle à distance,
 - les services de géo-localisation.
- **L'industrie connectée** : dans le cadre des problématiques rencontrées dans le domaine industriel, l'usage des objets connectés est très spécifique et répond à des besoins :
 - d'optimisation (*chaîne logistique*),
 - de transformation des processus d'entreprise,
 - d'amélioration de l'efficacité et de la productivité,
 - de traçabilité et de sécurité.



FIGURE 1.1 – Domaines d'application

1.2.4 Évolution de l'écosystème de l'internet des objets

Les premiers objets connectés n'apparaissent que dans les années 1990. Il s'agit de grille-pain, machines à café ou autres objets du quotidien. En 2000, le fabricant coréen *LG*² est le premier industriel à parler sérieusement d'un appareil électroménager relié à internet. Les années 2000 verront les premières expérimentations d'appareils connectés à internet. Ils l'utilisent notamment pour consulter des informations de manière automatique [6].

En 2003, la population mondiale s'élevait à environ 6,3 milliards d'individus et 500 millions d'appareils étaient connectés à internet. Le résultat de la division du nombre d'appareils par la population mondiale (0,08) montre qu'il y avait moins d'appareil connecté par personne. Selon la définition de *Cisco IBSG*, l'*IdO* n'existait pas encore en 2003 car le nombre d'objets connectés était faible.

En raison de l'explosion des smartphones et des tablettes, le nombre d'appareils connectés à internet a atteint 12,5 milliards en 2010, alors que la population mondiale était de 6,8 milliards. C'est ainsi que le nombre d'appareils connectés par personne est devenu supérieur à 1 (1,84 pour être exact) pour la première fois de l'histoire. En affinant ces chiffres, *Cisco IBSG* a situé l'apparition de l'*IdO* entre 2008 et 2009 (voir Figure 1.2).

En ce qui concerne l'avenir, *Cisco IBSG* estime que 50 milliards d'appareils seront connectés à internet d'ici 2020. Il est important de noter que ces estimations ne tiennent

2. <https://www.lg.com/fr>

pas compte des progrès rapides d'internet ni des avancées technologiques, mais reposent sur les faits avérés à l'heure actuelle [7].

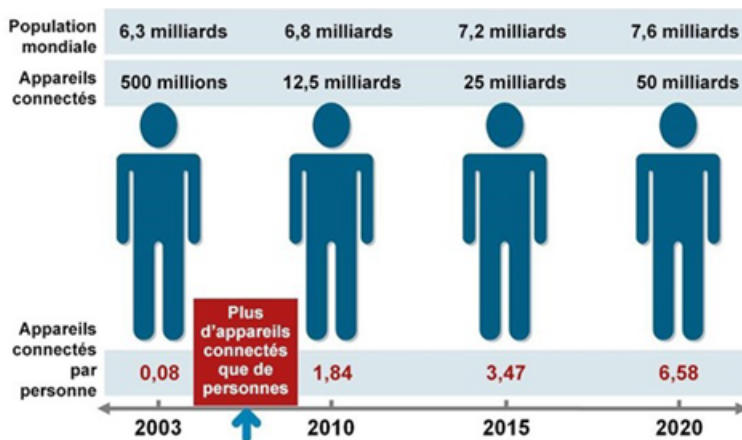


FIGURE 1.2 – Évolution d'IdO entre 2003 et 2020.

1.2.5 Architecture de l'internet des objets

Vu le développement rapide de l'*IdO*, il est devenant nécessaire d'avoir une architecture de référence qui permettrait d'uniformiser la conception des systèmes et favoriserait l'interopérabilité et la communication entre les différents écosystèmes de l'*IdO* (voir la figure (1.3) présente la chaîne de valeur *IdO/M2M*). Par exemple, un objet de marque *X* devra pouvoir envoyer des informations à une plateforme *Y* via le réseau *Z*. L'interopérabilité peut être vue sous deux angles, soit "fermée" au sein de grands écosystèmes qui partagent les mêmes standards, soit "native" basée sur des standards plus globaux [1].

En mars 2015, le comité Internet Architecture Board (*IAB* qui a pour objectif de veiller au développement d'internet) édite la *RFC 7452* (*Requests For Comments, sont une série numérotée de documents officiels décrivant les aspects techniques d'internet, ou de différents matériels informatiques*). Il propose quatre modèles communs d'interactions entre des acteurs de l'*IdO* (voir [1] page 64) :

- La communication entre objets : ce modèle est basé sur une communication sans-fil entre deux objets. Les informations sont transmises grâce à l'intégration d'une technologie de communication sans-fil comme bluetooth.
- La communication des objets vers le cloud : dans ce modèle, les données collectées par les capteurs envoient à des plateformes de services via un réseau.

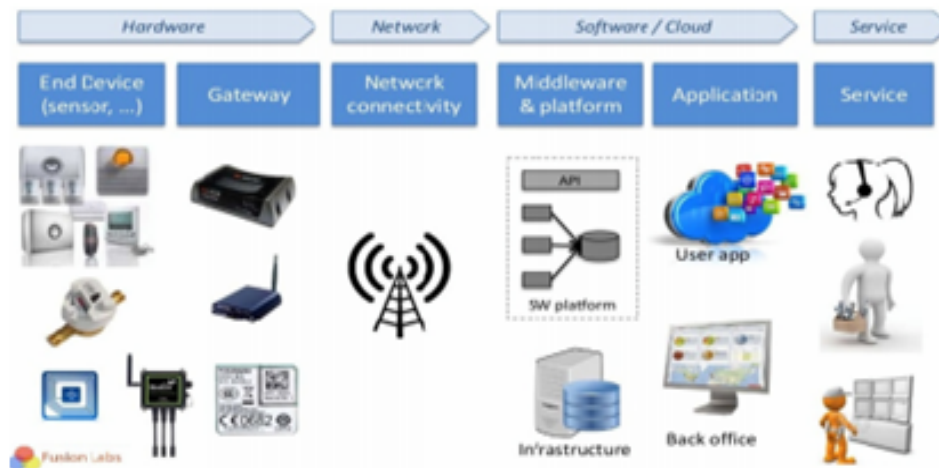


FIGURE 1.3 – Architecture d'internet des objets.

- La communication des objets vers une passerelle : ce modèle est basé sur un intermédiaire qui fait le lien entre les capteurs et les applications dans le cloud.
- Des objets au partage des données en back-end : l'objectif de ce modèle permet le partage des données entre les fournisseurs de services. Il est basé sur le concept «*web programmable*». Les fabricants mettent en place une *API* (*Application Programming Interface*) permettant l'exploitation des données agrégées par d'autres fabricants [8].

D'autres organismes proposent d'autres types d'architectures pour l'*IdO* qui privilégient les contextes des applications. L'organisme de standardisation IEEE Standards Association (*IEEE-SA*) a créé le groupe de travail *IEEE P2413* qui prend en compte les variétés des contextes des domaines d'applications de l'*IdO*. *IEEE* s'est fixé les objectifs suivants :

- Proposer un modèle de référence qui prend en compte les relations, les interactions et les éléments d'architectures communes pour divers domaines.
- Développer une architecture de référence qui soit compatible et prendre en compte tous les domaines des applications [8].

1.2.6 Avantages d'internet des objets

Les applications d'*IdO* dans la ville permettent notamment d'optimiser [9] :

- Les consommations d'énergie.

- La gestion du mobilier urbain.
- L'élimination des déchets.
- elles facilitent également la mobilité.

Les bénéficiaires de ces dispositifs sont les consommateurs, les citoyens, les institutions territoriales et les entreprises.

1.3 Villes intelligentes

Avec des populations de plus en plus nombreuses en zones urbaines, les villes sont aujourd'hui contraintes de s'adapter à cette croissance de manière réfléchie en adoptant des politiques prévues sur le long terme. C'est de cette obligation qu'est né le statut de "ville intelligente", appelée aussi *Smart City* en anglais [10].

1.3.1 Quelques définitions des villes intelligentes

Définition 1 : une ville intelligente (ou *Smart city en anglais*) est une ville qui privilégie les technologies de l'information et de la communication pour favoriser une meilleure interaction et collaboration avec ses citoyens, et améliorer la qualité de vie de ses habitants [10].

Définition 2 : les villes intelligentes (ou *Smart Cities*), sont des communautés qui exploitent la technologie pour transformer les systèmes et services physiques de manière à améliorer la vie de ses résidents et de ses entreprises tout en rendant l'administration plus efficace. Il ne s'agit pas uniquement d'une simple automatisation des processus mais d'un lien entre systèmes et réseaux pour rassembler et analyser des données qui sont alors utilisées pour transformer des systèmes entiers [11].

1.3.2 Composantes de la ville intelligente

Différents modèles de ville intelligente sont présentés dans la littérature. Les modèles holistiques de Giffinger [12] et de Cohen [13] sont ceux qui sont le plus souvent utilisés pour démontrer les six composantes de la ville intelligente.

Le modèle de ville intelligente présenté ci-dessous, de Rudolf Giffinger [12] expert en recherche analytique du développement urbain et régional de l'université technologique de Vienne, présente les six leviers à considérer pour devenir une ville intelligente.

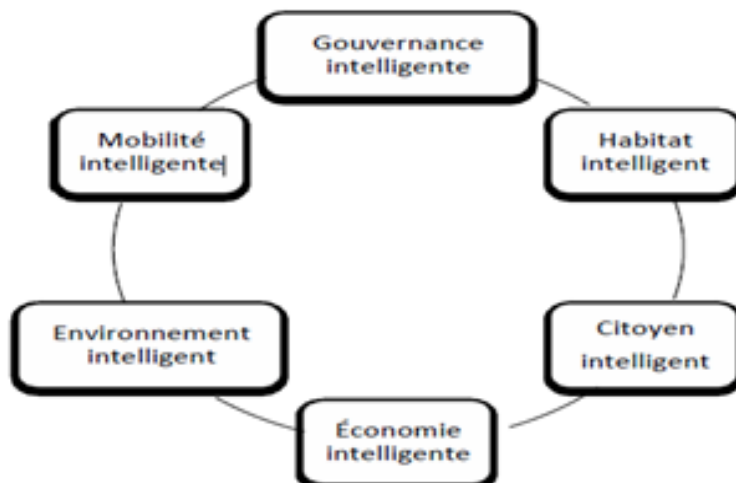


FIGURE 1.4 – Schéma des six leviers d'une ville intelligente (Inspiré de : [12])

La seconde figure (*Figure 1.5*) a été élaborée par Boyd Cohen³. Cette figure, nommée la « *Smart City wheel* », présente les six dimensions pour devenir une ville intelligente. Dans la deuxième roue de ce diagramme circulaire, Boyd Cohen suggère les domaines dans lesquelles les différentes dimensions s'appliquent. Finalement, il propose également divers indicateurs pour mesurer la performance des six dimensions.

Le modèle de ville intelligente de Giffinger et celui de Cohen se ressemblent sensiblement. Les deux modèles intègrent six dimensions pour devenir une ville intelligente. Pour bien comprendre la pertinence de ces six dimensions en relation avec les problématiques auxquelles elles répondent. Le tableau représenté dans (*Figure 1.6*), constitue une synthèse présentant les dimensions ou leviers pour devenir une ville intelligente, les défis urbains actuels, les outils de mise en œuvre ainsi que les objectifs visés.

3. Boyd Cohen : chercheur, professeur et expert en stratégies urbaines et climatiques. Il est également spécialisé dans le domaine des villes intelligentes

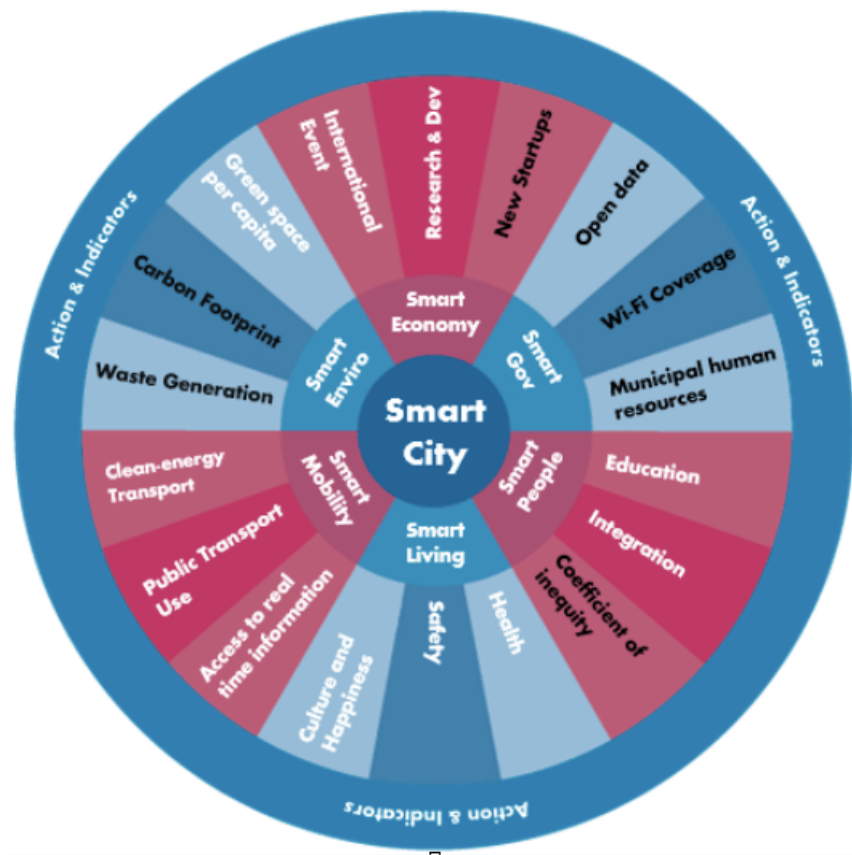


FIGURE 1.5 – Smart City wheel (Tiré de : [13]).

Les six composantes de la ville intelligente présentées dans les schémas de Giffinger et de Cohen sont illustrées de façon non hiérarchique. Tel que classé dans la figure (1.6) mentionné précédemment et dans les paragraphes qui suivent, chacune des composantes est définie selon une hiérarchie proposée. Cette hiérarchie est en fait une suite logique de processus ou étapes par lesquels une ville deviendra intelligente [14] :

- **Gouvernance intelligente** : la gouvernance intelligente englobe l'ensemble des usages de ces technologies pour améliorer la gouvernance urbaine. Les autres dimensions relevées de la gouvernance intelligente sont l'interopérabilité entre les différents services de la ville, la transparence dans la génération des données, la protection des informations et des libertés individuelles des citoyens.
- **Citoyen intelligent** : le citoyen est une importante partie prenante dans la ville intelligente. Sa participation est requise, le citoyen intelligent est celui qui utilisera les nouveaux outils technologiques, notamment pour participer aux débats publics et à la vie de quartier.
- **Économie intelligente** : une économie intelligente, c'est un pilier économique

Dimensions de la ville intelligente	Défis urbains actuels	Outils de mise en œuvre	Objectifs et résultats visés
Gouvernance intelligente	-Gouvernance fermée et peu transparente.	-Panneaux informatifs électroniques - Web diffusion -Logiciel pour le suivi des requêtes en ligne	-Gouvernance intégrée, transparente, ouverte et favorisant la coopération.
Citoyen intelligent	-La qualité des services rendus aux citoyens. -La participation citoyenne.	-Plateforme en ligne pour favoriser la participation du public	-Favoriser la créativité et la flexibilité des citoyens et la participation à la communauté dans le but d'améliorer son milieu de vie.
Économie intelligente	-Difficulté d'attirer de nouvelles entreprises au centre de la ville.	-Transactions en lignes -Échanges de données informatisées	-Attirer des entreprises et de la main-d'œuvre. -Créer des emplois durables créant de la valeur.
Mobilité intelligente	-Infrastructures routières vieillissantes, congestion du réseau routier, demande croissante en transport en commun.	-Systèmes de géo-localisation. -Bornes de recharge électriques. -Ecrans électroniques. -Application cellulaire. -Caméras.	-Optimiser les différents systèmes de transport en commun et transport actif, le tout coordonné efficacement par des systèmes technologiques.
Environnement intelligent	-Consommation des ressources naturelles, gestion de l'eau, gestion des matières résiduelles.	-Capteurs. -Senseurs. -Smart grids.	-Utiliser les ressources naturelles de façon durable et protéger l'environnement naturel. -Favoriser la planification et l'aménagement durable du territoire. -Créer un environnement sain qui favorise une vie de quartier.
Habitat intelligent	-Gestion du développement urbain, étalement urbain, qualité et accessibilité aux services offerts.	-Plateforme d'échange web pour les quartiers. -Nouvelles technologies pour les habitations écologiques.	-Crée un milieu de vie sécuritaire qui rassemble des composantes culturelles, des services de santé et d'éducation, qui offre des bâtiments de qualité et où il y a une cohésion sociale.

FIGURE 1.6 – Synthèse des six dimensions pour devenir une ville intelligente.

dont on se sert comme vecteur pour l'innovation et la création d'emplois durables pour la ville. Selon Giffinger [12], une économie intelligente est basée sur un esprit d'innovation et d'entrepreneuriat, sur la productivité et la flexibilité du marché. Elle possède aussi une aptitude à se transformer et à enchâsser le marché international.

- **Mobilité intelligente** : le transport a été l'un des premiers secteurs à intégrer des dispositifs numériques pour mieux gérer les flux dans la ville. L'accès aux données de transport en temps réel via des écrans électroniques dans les stations, dans les autobus ou encore via les téléphones intelligents personnels permettrait aux usagers de connaître une foule d'informations. Une mobilité intelligente qui serait possible grâce aux divers centres de gestion des données, aux capteurs d'informations et aux caméras. Ainsi, les utilisateurs des transports deviennent des producteurs de données. Une mobilité intelligente passe aussi par le développement et l'accès aux applications qui permettraient aux usagers de vivre l'expérience d'une mobilité intelligente.
- **Environnement intelligent** : la ville intelligente prend des mesures pour réduire les émissions de polluants et d'irritants, mais également assure une meilleure gestion des ressources de l'environnement fondé sur les principes du développement durable. Les «*smart grids*», une technologie informatique des réseaux de distribution d'électricité intelligents, peut optimiser la production et la distribution d'électricité tout en s'ajustant à la demande. Économiser de l'énergie via de nouvelles technologies c'est aussi ça un environnement intelligent.
- **Habitat intelligent** : l'habitat intelligent peut être applicable à différentes échelles. À l'échelle du milieu de vie, il peut s'agir d'un milieu de vie sécuritaire. De plus, il peut s'agir de développer des quartiers verts ou des éco-quartiers. À l'échelle de l'habitat, il peut s'agir d'habitations écologiques, voire des habitations qui sont certifiées selon le Leadership in Energy and Environmental Design (*LEED*) ou encore des habitations qui comprennent certaines composantes écologiques [15].

1.3.3 Quatre risques importants pour les villes intelligentes

Le chercheur néerlandais Jorrit de Jong [16], directeur académique du programme "innovation et gouvernance" à l'université de Harvard, perçoit toutefois des risques potentiels

importants :

- Le premier risque est celui du piratage informatique. Plus les systèmes deviennent inter-connectés, plus les risques sont élevés que des informaticiens de mauvaise volonté piratent ces systèmes, tels que l'éclairage public, les centrales énergétiques et certaines autres infrastructures. Les autorités publiques de petite taille n'ont souvent pas suffisamment d'expertise pour se protéger contre ce genre d'événements.
- Les problèmes éthiques liés au développement des algorithmes. Ces algorithmes permettent de découvrir par exemple une structure sous-jacente dans certains phénomènes, tels que la petite criminalité. L'application d'algorithmes peut mener à une discrimination de personnes issues de certaines classes sociales ou de certaines origines ethniques.
- Les entreprises gagnent trop d'influence. Les solutions des villes intelligentes sont souvent développées en collaboration avec les entreprises informatiques. Ceci leur permet de rassembler d'énormes bases de données, qui peuvent constituer une atteinte à la vie privée.
- Les autorités publiques et les grands projets de TIC (*Technologies d'Information et de Communication*) ne font pas toujours bon ménage. Il est important que tous les départements concernés partagent leurs bases de données et qu'il existe suffisamment d'expertise technique au sein des organisations.

1.3.4 Top 5 des villes intelligentes et durables dans le monde

1. **Singapour** « *la reine des Smart Cities* » : dans une ville où 85% des habitants possèdent un smartphone, Singapour a lancé un programme Smart nation pour répondre aux enjeux de mobilité, de gestion de l'énergie et d'innovation verte. La ville accueille ainsi le CleanTechPark, qui regroupe des industries vertes et des bâtiments écologiques.

En termes de mobilité, l'objectif est de réduire au maximum l'usage de la voiture : gratuité des transports sur certaines tranches horaires, modulation des tarifs des péages en fonction de la circulation, véhicules autonomes et partage de véhicules électriques.

Pour sensibiliser les citoyens aux économies d'énergie, les factures d'électricité et de gaz mentionnent les consommations moyennes du quartier afin de permettre de

se situer par rapport aux autres.

2. **Barcelone** « *un modèle de Smart City* » : Barcelone est une cité intelligente et avant-gardiste. La ville a créé l'UrbanLab, un laboratoire d'expérimentation à destination des entreprises, leur permettant de tester un projet sur le terrain avec l'appui des services de la ville.

Très connectée, la ville s'est dotée de capteurs pour gérer les éclairages, les espaces verts et les feux de signalisation. Outre la collecte de déchets intelligente afin d'optimiser les déplacements, la mobilité et la circulation occupent le devant de la scène des préoccupations. La ville a été sollicitée par la Banque mondiale pour développer un standard de "Smart City" s'inspirant de son modèle déjà bien avancé.

3. **Londres** « *Smart City en CO-construction* » : avec l'augmentation croissante de sa population, la ville de Londres est impliquée depuis plusieurs années dans une démarche "intelligente" et durable.

Pour impliquer les citoyens, la ville a mis en place une plateforme « *Talk London* » qui regroupe toutes les informations utiles pour vivre, travailler, circuler à Londres. Le site permet aussi de recueillir les avis et les opinions des habitants grâce à des enquêtes et des sondages.

Concernant la mobilité, Londres a été précurseur en instaurant dès 2003 un péage pour les automobiles. La ville a également développé un système d'incitation à la marche : les piétons sont accompagnés tout au long de leur parcours grâce à des bornes interactives.

4. **San Fransisco** « *entre open data et grid renouvelable* » : dès 2009, la mairie a mis à disposition des citoyens et des acteurs privés des données municipales en libre-accès. Cette politique de transparence a permis la création de pas moins de 60 applications, conçues pour faciliter la vie des habitants et les informer dans des domaines tels que la santé, la mobilité, la bio-diversité. Déterminée à être une des villes les plus smart du monde, San Francisco s'est doté en 2012 d'un *Chief Innovation Officer* pour favoriser l'émergence de solutions connectées. Très engagée dans le domaine de développement durable, et notamment le recyclage des déchets, la ville s'est également engagée à ce que la totalité des services municipaux passent à l'énergie 100% renouvelable.

5. **Oslo « la capitale Norvégienne connectée »** : à Oslo, l'accent est mis sur l'éclairage intelligent : 10 000 lampadaires ont été équipés de capteurs permettant d'ajuster la luminosité en fonction des saisons et des besoins en éclairage. L'objectif étant de réduire les consommations d'électricité de 70%.

L'exemple norvégien a inspiré d'autres villes d'Europe qui ont adopté le projet *e-street* : 11 pays s'engagent pour réduire leurs consommations électriques grâce aux lampadaires connectés.

D'ici 2019, la ville souhaite supprimer l'usage de la voiture en zone urbaine. Pour cela, une ambitieuse politique de mobilité basée sur l'offre de transports en communs a été lancée [17].

1.4 Quelques usages clés des technologies internet des objets pour la ville intelligente

— Gestion du trafic, du transport, de la mobilité et des solutions de stationnement :

Les problèmes de mobilité constituent une question majeure que rencontrent les citoyens. Les infrastructures *IdO* peuvent fournir des solutions dynamiques et intelligentes pour réduire les problèmes de mobilités et de stationnement [9] :

1. Éviter les embouteillages,
2. suggérer le temps possible pour se déplacer,
3. donner des informations de stationnement disponibles.

Les objectifs et résultats attendus doivent économiser du temps, de l'énergie, des émissions de gaz et particules et maintenir un flux de circulation aisé.

— Gestion des déchets :

La gestion des déchets est un enjeu important pour les institutions territoriales des zones urbaines. Une population génère une grande quantité de déchets. Les bacs intelligents de l'*IdO*, les méthodes d'élimination des ordures, les dispositifs de surveillance des déchets aideront les quartiers à maintenir un environnement propre, agréable et apaisé .

— Systèmes de sécurité :

La sécurité et la sûreté sont les principales préoccupations des autorités et gou-

vernements dans le monde entier. Sans technologie, il est difficile de retracer les éléments négatifs dans les villes et les villes trop encombrées. Des programmes de surveillance de qualité supérieure sont nécessaires pour éliminer les menaces. Les capteurs sonores *IdO*, la vidéo surveillance intelligente, les lampadaires intelligents et la dernière technologie de drone peuvent rapidement aider la police et le personnel de sécurité à détecter des lieux à risques, les suspects impliqués et le nombre de personnes touchées [9].

1.5 Avantages et applications d'internet des objets aux villes intelligentes

L'internet des objets offre de nombreux avantages et applications aux villes intelligentes, notamment [18] :

- Amélioration des services publics traditionnels tels que les transports, la circulation et le stationnement.
- Contrôle et maintenance des espaces publics,
- Suivre la validité des bâtiments et des établissements de travail.
- Réduisez le temps perdu dans les transactions administratives dans la ville.
- Fournir la consommation d'énergie de la ville.
- Éclairage intelligent pour la ville.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons survolé d'une façon générale la technologie internet des objets et les villes intelligentes. Nous avons défini c'est quoi l'*IdO*, son domaine d'application, son évolution, après nous avons présenté son architecture, ses composants et quelques avantages. Ensuite, nous avons présenté les villes intelligentes et nous avons donné quelques composantes, et nous avons donné un exemple de ces top villes. Enfin nous avons terminé par quelques usages clés des technologies *IdO* pour la ville intelligente et les avantages d'*IdO* aux villes intelligentes.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présentés un état de l'art de la gestion des feux tricolores.

État de l'art sur la gestion des feux tricolores

2.1 Introduction

Un réseau routier est conçu afin de permettre à ses usagers de se déplacer d'un point à un autre. Dans ce contexte, il est composé d'un ensemble de routes avec plus ou moins de voies, en fonction des zones d'activités et des lieux d'habitation. Les croisements entre les routes étant inévitables en milieu urbain, de par leur concentration, des intersections permettent de gérer les flux de véhicules entrant en conflit, pour leur sécurité et afin d'éviter les inter-blocages et de permettre aux automobilistes de changer de route. Ces intersections, ou dans certains cas des carrefours giratoires, régulent le trafic et appliquent généralement des règles de priorité à droite ou sont équipés de feux de circulation pour gérer les situations particulièrement dangereuses.

Dans ce chapitre, nous donnons en premiers les notions de base des feux tricolores, leurs significations. Ensuite, l'histoire, l'évolution et les domaines d'application. Ainsi, nous allons présenter quelques systèmes existants pour la gestion des feux de tricolores, quelques outils théoriques du gestion de trafic routier, systèmes de transport intelligents. On conclut ce chapitre avec des algorithmes de plus court chemin dans le domaine du transport et quelques inconvénients de ces systèmes.

2.2 Définition des feux de circulation tricolores

Un feu de circulation routière est un dispositif permettant la régulation du trafic routier entre les usagers de la route, les véhicules et les piétons. Les feux destinés aux véhicules

à moteurs sont généralement de type tricolores, auxquels peuvent s'ajouter des flèches directionnelles. Ceux destinés aux piétons sont bicolores et se distinguent souvent par la reproduction d'une silhouette de piéton. Les feux tricolores pour cyclistes se distinguent par la reproduction d'une bicyclette¹.

Généralement, un feu tricolore est composé d'un système électronique commandé. Il est composé de trois couleurs principales. La couleur rouge indique l'obligation d'arrêt aux véhicules. La couleur orange qui ne dure que quelques secondes signale le passage du rouge au vert. La couleur verte indique aux véhicules qu'ils ont la priorité exclusive pour passer. Ces couleurs ont été choisies parce qu'elles ont l'avantage d'être très distinctes [19].

Le système des feux de signalisation est le système le plus efficace pour la gestion du trafic, car il évite tout malentendu entre les différents conducteurs au moment du passage. Cependant, c'est aussi le système qui génère le plus de retard puisqu'il favorise à chaque instant un ou deux flux (*qui ne se croisent pas*) et oblige systématiquement l'arrêt de tous les autres flux entrants [20].

2.3 Terminologie

- **Un flux de véhicules** : est l'ensemble des véhicules entrant par une voie donnée et ressortant par une autre. Le trafic dans une intersection est constitué d'un ensemble de flux de véhicules, chacun provenant d'une source. Deux flux sont cohérents s'ils peuvent évacuer l'intersection simultanément. Une intersection gérée par des feux de signalisation est composée de plusieurs feux tricolores, implantés sur les différentes voies entrantes dans l'intersection [20].
- **Un cycle d'un feu** : représente la durée qui sépare deux phases identiques de l'intersection. Il est défini par une séquence de phases [20].
- **Une phase d'un feu** : est une période durant laquelle un ou plusieurs flux cohérents sont admis dans le carrefour [20].
- **Un carrefour** : est défini comme étant une intersection de plusieurs rues où différents flux de véhicules doivent circuler de manière ordonnée. Un ensemble de carrefours constitue un réseau, chaque carrefour possède un cycle [21].

1. <http://www.wikipedia.org>

2.4 Histoire et l'évolution des feux de circulation

Au début des années 1900 [22], le monde se développait à un rythme très rapide et, avec la croissance de l'industrialisation, les villes devenaient de plus en plus surpeuplées. En outre, avec l'invention de l'automobile, le trafic sur les routes a considérablement augmenté, ce qui a rendu nécessaire un meilleur système de circulation.

En 1912, un policier américain, *Lester Wire*, préoccupé par l'augmentation du trafic, a eu l'idée du premier feu de signalisation électrique. Conformément à la conception de *Wire*, les phares ont été installés pour la première fois à Cleveland, dans l'Ohio, le 5 août 1914, à l'angle de la 105th et de Euclid Avenue.

1914 : le premier signal électrique à commande manuelle arrive à Cleveland :

Comme le sémaphore de 1910 [23], le premier signal électrique utilisait des mots. Cependant, les mots n'étaient plus écrits sur les bras qui se soulevaient et tombaient. Les mots «*Stop*» ou «*Move*» étaient allumés. Les poteaux s'illuminaient sur chacun des quatre poteaux d'angle autour d'une intersection. Ce n'était pas automatisé, cependant. Une cabine avec un opérateur était nécessaire pour actionner les commutateurs.

Le système permettait aux policiers de passer du centre de la rue à un coin. De ce point de vue, un officier pourrait surveiller la foule. Si un véhicule d'urgence arrivait, l'agent pourrait actionner un commutateur et dégager l'intersection en allumant tous les feux rouges. Le véhicule d'urgence pourrait maintenant passer sans effort.

Des signaux tricolores, actionnés manuellement depuis une tour située au milieu de la rue, ont été installés à New York en 1918.

En 1920 [22], un policier du nom de *William Potts*, à Detroit, dans le Michigan, a inventé les premiers feux de circulation à quatre couleurs et à trois couleurs. Outre le rouge et le vert, une troisième couleur orange (*ou jaune*) a été introduite. Detroit est devenue la première ville à avoir mis en place des feux tricolores. Dans les années 1920, plusieurs feux de signalisation automatisés ont été installés dans les principales villes du monde. Le feu de signalisation moderne utilise toujours ce célèbre modèle en forme de T avec trois couleurs différentes .

Les premières lumières de ce type apparaissant en Grande-Bretagne se trouvaient à Londres. Sur la jonction entre *St James Street* et *Piccadilly*, en 1925. Ils étaient actionnés manuellement par des policiers à l'aide d'interrupteurs. Des signaux automatiques, fonctionnant sur un intervalle de temps, ont été installés à Wolverhampton, en 1926. Les

premiers signaux activés par un véhicule en Grande-Bretagne ont eu lieu à la jonction entre *Gracechurch Street* et *Cornhill on the City*, en 1932. Les signaux normalisés rouge-orange-vert sont maintenant universellement adoptés [24].

2.5 Domaines d'emploi

L'emploi des feux de circulation a pour but d'assurer la sécurité des piétons et des usagers des véhicules et d'améliorer la fluidité de la circulation [25].

On peut citer comme exemples d'emploi :

- La gestion du trafic aux intersections,
- La traversée des piétons,
- L'exploitation par sens uniques alternés d'une section où le croisement est impossible ou dangereux (*ouvrage d'art étroit, etc*),
- L'affectation de certaines voies d'une chaussée à un sens de circulation en fonction des besoins, ou leur condamnation momentanée,
- Le contrôle d'accès à certaines voies rapides,
- La gestion d'un point de contrôle des personnes ou des véhicules nécessitant leur arrêt (*péage*),
- La protection d'obstacles intermittents (*passages à niveau, traversées de voies exclusivement réservées aux véhicules des services réguliers de transport en commun, ponts mobiles, passages d'avions, avalanches, etc*).

2.6 Systèmes existants de gestion des feux tricolores

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

2.6.1 *TRANSYT*

Le premier modèle commercialisé a été *TRANSYT* (*Traffic Network Study Tool*) c'est un programme d'optimisation de la commande des feux en temps fixe [26]. Pour un réseau comprenant un certain nombre de tronçons et de carrefours et pour une période ca-

ractéristique pendant laquelle les débits entrants dans le réseau sont considérés constants, le programme détermine les plans de feux (*répartitions optimales de durées de vert entre les différentes branches de tous les carrefours et décalages optimums entre ces mêmes carrefours*) conduisant à un fonctionnement optimal du réseau. Tous les feux du réseau fonctionnent sur la même durée de cycle.

La première version de *TRANSYT* date de 1967 et a été développée par le *TRRL* (*Transport and Road Research Laboratory*) en grande Bretagne. Depuis, les plans de feux calculés par *TRANSYT* sont à la base de nombreux systèmes de régulation de trafic implantés dans de nombreuses villes britanniques et à travers le monde. *TRANSYT* est également devenu un système de référence pour l'évaluation de l'efficacité des systèmes de régulation temps réel. IL continue à être amélioré, sa dernière version (*version 10 new release*) date de 1996. A partir de la représentation du réseau et des données d'entrée et caractérisant

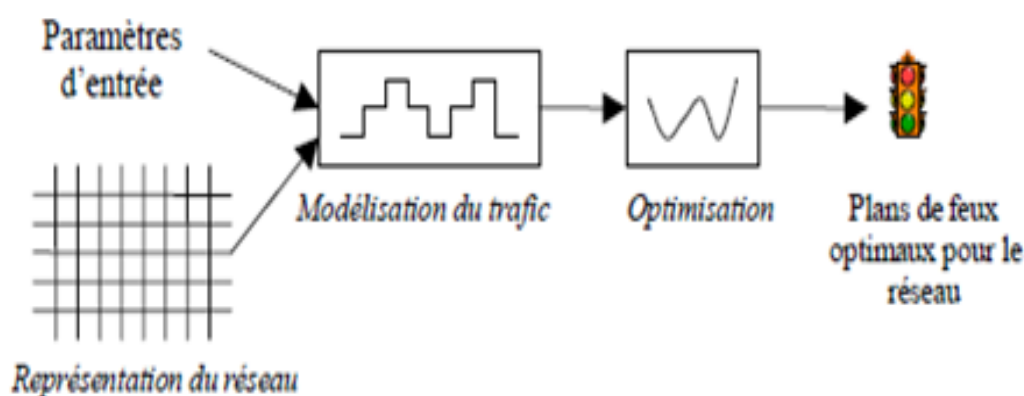


FIGURE 2.1 – Architecture de *TRANSYT*

l'écoulement du trafic sur le réseau, le modèle d'écoulement du trafic calcule un indice de performance global du réseau. Le module d'optimisation cherche les plans de feux minimisant cet indice .

2.6.2 *SCOOT*

SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*)[27], un système de contrôle à la fois réactif et adaptatif et entièrement centralisé, développé par le *TRL* (*Traffic Research Laboratory, un centre de recherche anglais sur les transports*). À l'aide de détecteurs placés

sur le terrain, SCOOT se base notamment sur un indice de performance afin de générer des plans de feux en fonction de la demande des utilisateurs. Cet indice est calculé par rapport au délai d'attente moyen, à la longueur des files d'attente et des arrêts sur le réseau. Cet aspect dynamique est réalisé à l'aide d'un aller-retour régulier de mesures et de décisions entre les équipements sur le terrain et un centre de contrôle. Cette centralisation et ce suivi régulier de la circulation impliquent un passage à l'échelle limitée, car de gros besoins en calcul sont nécessaires et car tous les détecteurs doivent être inter-connectés. Cela limite leur déploiement aux plus grands carrefours.

2.6.3 SCATS

SCATS (*Sydney Coordinated Adaptive Traffic System*) [28], qui a été à l'origine développé pour Sydney et d'autres villes Australiennes. Il est pour sa part entièrement adaptatif et utilise une notion d'hierarchie (*ce qui forme une certaine distribution sur le réseau*). Entre le recueil des données sur le terrain et le centre de contrôle, des contrôleurs intermédiaires sont insérés, permettant d'alléger la charge globale du système et d'avoir un contrôle découpé en plusieurs zones, l'ensemble des acteurs utilisant des communications synchronisées. De manière similaire à SCOOT, ce système ajuste le temps des cycles et autres paramètres en fonction des données recueillies afin de diminuer le délai et les arrêts, mais n'utilise pas la même stratégie. Les valeurs recueillies permettent la sélection de plans de feux parmi une large librairie, sur lesquels le système va se baser pour proposer des plans adaptés. De plus, contrairement à SCOOT, les détecteurs sont uniquement placés au niveau des feux de circulation.

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 feux. Le plan de feu est ainsi reconstitué et non stocké tel quel dans une bibliothèque (*Figure 2.2*).

Ce système de régulation ne comprend pas de module d'écoulement du trafic : son fonctionnement ne repose que sur la disponibilité de données explicites décrivant le trafic. L'objectif général est de minimiser les retards et les arrêts par choix des paramètres de base du système de régulation du trafic, tels que la durée de verts, les décalages et la durée de cycle. La régulation se décompose en deux niveaux ; une régulation stratégique sur des ensembles de carrefours et une régulation tactique au niveau de chaque carrefour.

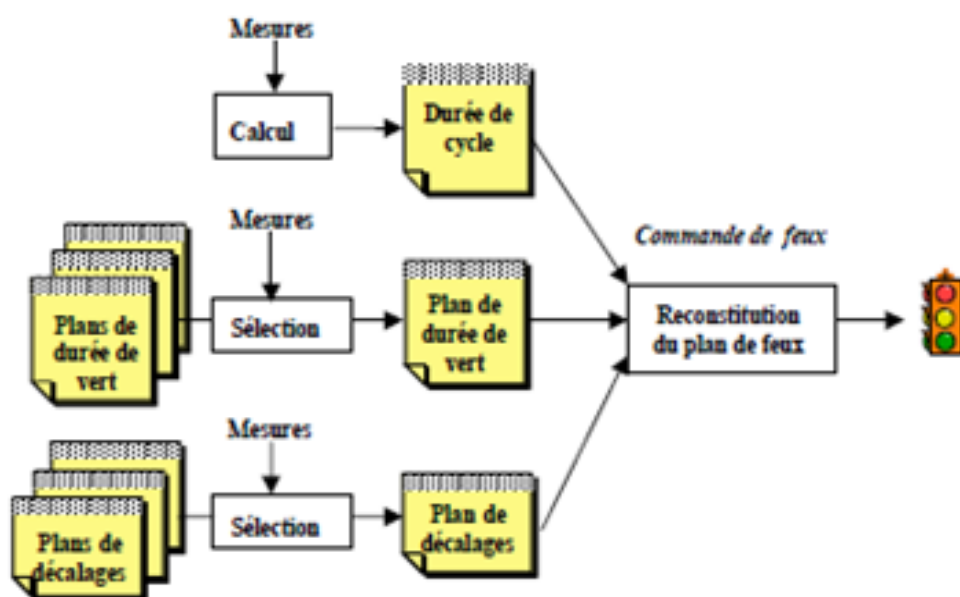


FIGURE 2.2 – Principes généraux de SCATS.

2.6.4 PRODYN

PRODYN (*PRO*grammation *DYN*amique) [29] est un système décentralisé et adaptatif au trafic développé par le CERT (*Centre d'Etude et de Recherche de Toulouse*) en France dans les années 1980. Dans ce système, 2 à 3 boucles électromagnétiques sont disposées sur chaque tronçon, et l'état supposé du trafic sur chaque voie est estimé à l'aide d'un modèle d'écoulement simple permettant d'anticiper la progression des véhicules sur la voie. Ce système réalise une optimisation sur l'intersection "isolée", toutefois certaines versions de ce système permettent une communication entre les intersections voisines afin d'anticiper les flux entrants. La stratégie utilisée par ce système consiste à analyser à chaque pas de temps (*de 5 secondes*) si commuter l'état du feu (*i.e. changer de phase*) est la décision optimale, c'est-à-dire si elle minimise le temps d'attente des véhicules devant l'intersection pour les 75 prochaines secondes d'après le modèle d'écoulement utilisé.

2.7 Limites des approches étudiées

Plusieurs aspects peuvent être perçus comme des limitations de ces systèmes. Nous présentons ici ceux qui nous paraissent les plus importants [26] :

- **Hypothèses simplificatrices** : le premier problème est que ces différents systèmes

(ces quatre plus d'autres) font des hypothèses simplificatrices (*prédiction du trafic pour TRANSYT, variation des durées de feux selon des pas prédéfinis pour SCOOT, bibliothèques prédéfinies de décalages et de durées de feu vert pour SCATS, etc...*) qui ne reflètent pas forcément la réalité. Ces hypothèses sont essentielles pour ces systèmes, sinon les plans des feux de signalisation deviennent complexes à calculer et donc impossibles à exécuter en temps réel.

- **Approches autonomes pour véhicules non autonomes** : un autre problème de ces différents systèmes est qu'ils ont été conçus pour les véhicules conduits par les humains. En effet, l'utilisation des véhicules classiques (*non autonomes*) pose un problème parce que, si les feux évoluent (*optimisation en ligne*), il faut « *idéalement* » prévenir les véhicules pour qu'ils puissent adapter leurs profils d'accélération au mieux.

En plus, nous avons remarqué que les optimisations proposées favorisent le plus souvent les routes principales, généralement les plus congestionnées, et défavorisent les routes secondaires, sachant que dans les grandes villes ces dernières sont devenues de plus en plus importantes dû à la saturation des axes traditionnels. En fin, d'autres aspects sont délaissés par ces systèmes. Par exemple, le trafic peut être affecté par des incidents (*accidents, blocages des routes, etc...*). Il est donc nécessaire d'avoir des approches robustes et flexibles pour une bonne gestion du trafic.

2.8 Outils théoriques de la gestion de trafic routier

Il est courant pour des modèles dynamiques de la littérature se servir d'outils théoriques, parfois en faisant un rapprochement à la réalité, parfois sans aucune notion physique (technologie utilisée, disposition). Dans les systèmes de gestion de trafic, plusieurs outils théoriques sont étudiés, répandus dans la littérature et servant de base à certains modèles étudiés.

2.8.1 Contrôle par la logique floue

La logique floue permet de mettre en place des degrés dans la vérification d'une condition, et non plus se borner à un choix strictement binaire. Ce principe est utilisé par

quelques auteurs pour traiter le problème de la gestion des feux de circulation et permet de simplifier le problème, ce qui change des méthodes d'optimisation mathématique habituelles souvent lourdes. Quelques exemples de travaux peuvent être trouvés au travers de [30] [31]. Nous pouvons également citer [32] qui utilise la logique floue afin de déterminer le temps d'un feu en fonction du nombre de véhicules présents sur les voies : à un nombre de véhicules correspond un intervalle définissant une durée de feu (*exemple : moins de 5 véhicules par minute donne le feu vert pendant 10 secondes*). Ce principe apparaît comme idéal à utiliser :

- Théorie simple s'appliquant à des problèmes complexes,
- Robustesse de la commande floue par rapport aux incertitudes.

Les inconvénients sont tout de mêmes importants : les techniques de mise en place et les réglages sont empiriques et aucune théorie ne permet de démontrer la stabilité et la robustesse d'une telle méthode [33].

2.8.2 Algorithmes génétiques

Les auteurs de [34] ou encore [35] ont proposé d'optimiser le temps à une ou plusieurs intersections en se basant sur un algorithme génétique. Le principe est le suivant : obtenir une solution approchée d'un problème d'optimisation lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte afin de le résoudre en un temps raisonnable. Dans ce type d'algorithme, la solution est approchée par bonds successifs (*mutations*). Ainsi, en ayant connaissance du nombre de véhicules et du temps moyen d'attente à une intersection, l'algorithme va pouvoir appliquer des méthodes d'optimisation et les améliorer au fil de sa vie. Si l'idée paraît intéressante, les contraintes sont évidentes pour le cas du trafic routier :

- De nombreux calculs sont nécessaires,
- Paramètres difficiles à déterminer, et il peut y avoir un certain délai avant l'obtention d'un résultat réellement efficace,
- Il est impossible d'assurer qu'une solution trouvée soit la meilleure, même après une multitude de mutations.

2.8.3 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont inspirés du fonctionnement des neurones biologiques, et mettent en œuvre l'apprentissage par l'expérience. Dans le cas du trafic routier, plusieurs

auteurs se sont penchés sur ce schéma (*exemples* : [36, 37, 38]). Ici, il est question d'effectuer rapidement des classifications, et d'apprendre à les améliorer, plutôt que de passer par un schéma traditionnel de modélisation. La logique floue et les algorithmes génétiques peuvent être vus comme des compléments aux réseaux de neurones [36].

2.8.4 Théorie des files d'attente

La théorie des files d'attente [39] est particulièrement adaptée au cas de la gestion du trafic routier : cette dernière appartient au domaine des probabilités, et permet une gestion optimale des files d'attente (*ou queues*). Dans le cas des intersections, une file d'attente est automatiquement créée lorsque les véhicules (*clients*) souhaitent obtenir un feu au vert (*serveur*). Particulièrement, il est facile avec cette théorie de calculer des valeurs telles que le nombre moyen de véhicules en attente ($NbrV$), en service, le temps moyen d'attente (T) ou encore de séjour (TS) dans le système.

Afin de décrire un système utilisant une file d'attente, la notation de *Kendall* est généralement utilisée. Cette dernière peut se résumer par une suite de trois symboles $a/s/C$. Où a représente la loi de probabilité des instants d'arrivées et s la durée de service (*au feu*), qui est généralement exponentielle (M) ou générale (G). C représente pour sa part le nombre de serveurs (*1 dans le cas d'une voie*).

Si nous reprenons les métriques présentées dans la première partie, certaines valeurs vont être faciles à calculer à l'aide de cette théorie :

- Soit λ la fréquence moyenne d'arrivées et μ la fréquence moyenne de service.
- Soit la charge du système :

$$C = \frac{\lambda}{\mu} \quad (2.1)$$

- Prenons le cas d'une file $M/M/1$. Le temps moyen d'attente serait représenté par :

$$T = \frac{C}{\mu(1 - C)} \quad (2.2)$$

Le nombre moyen de véhicules en attente est donné par :

$$NbrV = \frac{C^2}{1 - C} \quad (2.3)$$

Le temps moyen de séjour dans le système est :

$$TS = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{1}{1 - C} \quad (2.4)$$

L'inconvénient de cette théorie est qu'elle nécessite un certain nombre de points de mesure dans le cas de la gestion d'une intersection.

2.9 Systèmes de transport intelligents

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

Dans les systèmes décentralisés, certaines informations peuvent éventuellement être échangées d'un carrefour à l'autre mais généralement la majorité d'entre eux ne tiennent compte que de l'information provenant du carrefour local pour leur optimisation. Les *STIs* centralisés relient les différents carrefours du réseau entre eux afin de rendre possible l'échange d'information. Le partage de ces informations permet alors d'optimiser les décalages des décisions de communication entre les carrefours en fonction du changement des conditions de trafic, ce qui permet une meilleure qualité de gestion de la circulation mais au prix d'une complexité beaucoup plus élevée que pour les systèmes décentralisés. Comme on peut le voir, les possibilités qu'amène l'utilisation des *STIs* sont nombreuses et débouchent sur de nouveaux problèmes d'optimisation [21].

Les systèmes de feux adaptatifs et semis adaptatifs sont tous les deux des systèmes qui utilisent des données en temps réel. Ces systèmes peuvent détecter la présence de véhicules d'un flux donné dans un carrefour et leur donner priorité au vert. Un système adaptatif détecte les véhicules sur tous les flux du carrefour et peut donc s'ajuster à la demande sur l'ensemble du carrefour. Le système semi-adaptatif n'a des détecteurs que sur les artères principales. Il ne s'ajuste donc qu'à la demande de ces derniers. Les artères secondaires ayant une demande moins élevée ne sont généralement pas équipées de détecteurs. Leur temps de vert sera donc ajusté en fonction des conditions observées dans les artères prin-

cipales et non des leurs, ce qui peut réduire la fluidité de la circulation pour ces approches.

2.10 Algorithmes de plus court chemin dans le domaine du transport

Les algorithmes de plus court chemin sont énormément utilisés dans le domaine du transport spécialement pour deux applications du transport public :

- Analyse des performances des réseaux de transport. Une phase de modélisation du réseau et d'analyse de performances doit être établie avant toute conception de réseau de transport. Cette analyse permet de faire un choix sur l'emplacement des lignes de transport, des arrêts et des stations.
- Aide au déplacement et planification des itinéraires dans les systèmes d'information avancés ATIS (*Advanced Traveler Information System*). Ceci revient à implémenter des algorithmes de plus court chemin sur les systèmes d'information d'aide au déplacement *SIAD* qui permettent de répondre à des requêtes locales d'itinéraires provenant de différents utilisateurs.

Le problème de plus court chemin consiste à trouver le chemin qui minimise le coût global et ce en partant d'un nœud de départ x vers un nœud d'arrivée y dans un graphe $G = (N, E)$, $x, y \in N$ et tel que les poids des arcs représentent le coût. Dans la littérature, cette problématique a fait l'objet de nombreuses recherches. Dans ce cadre, plusieurs algorithmes ont été mis en place pour traiter les spécificités des différents types de graphes (*graphes cycliques, graphes avec valeurs négatives ...*). Ces algorithmes sont souvent classés en deux catégories : les algorithmes de correction d'étiquettes et les algorithmes de fixation d'étiquettes. Il existe plusieurs algorithmes pour trouver le plus court et meilleur chemin, tel que : algorithme de Bellman-Ford-Moore, algorithme de Prim, algorithme de Kruskal et algorithme de Dijkstra,...

2.11 Inconvénients des feux tricolores

- Les feux de signalisation jouent un rôle non négligeable dans les émissions de CO_2 en ville. Les rejets de gaz carbonique triplent lorsque les véhicules sont bloqués dans des files créées par des feux de signalisation non synchronisés.

- Les véhicules doivent attendre jusqu'à 3 cycles dans certains rues et la perte de temps peut aller jusqu'à 5 minutes.
- Autre inconvénient est la concentration de particules fines augmenterait pour le monoxyde de carbone (CO) et pour l'oxyde d'azote (NOx).

2.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons survolé d'une façon générale les feux tricolores. Nous avons défini ces derniers, leur évolution et quelques systèmes de gestion. Ensuite nous avons présenté les outils théoriques de la gestion de trafic routier et les systèmes de transport intelligents. Enfin, nous avons terminé par les algorithmes de plus court chemin dans le domaine du transport et quelques inconvénients des feux tricolores.

Dans le prochain chapitre, nous allons proposer une nouvelle solution pour la gestion des feux tricolores.

Nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores

3.1 Introduction

Les systèmes de transport ont toujours joué un rôle primordial dans le développement d'un pays. En effet, des millions de véhicules transportent des personnes et des marchandises sur les réseaux routiers chaque jour. La gestion d'un tel réseau est devenue un élément essentiel. Depuis la seconde moitié du 20^{ème} siècle, le phénomène de la congestion routière, en particulier, a induit, pendant les heures de pointe, un grand problème dû principalement, à l'accroissement rapide du nombre de véhicules et la demande en transport. Il constitue, en effet, un problème crucial pour la société, à cause des coûts qu'il engendre.

Dans le domaine de la mobilité, les technologies de l'information et de la communication apportent progressivement, depuis plusieurs années, une " intelligence " qui améliore la sécurité, la sûreté, l'exploitation de l'information et le paiement. On parle alors de systèmes de transport intelligents. Il s'agit donc, de mettre en évidence l'intégration voir la fusion de l'informatique au cœur de nos activités quotidiennes.

Ce chapitre porte sur la partie conception. C'est à ce niveau que la solution que nous avons proposé sera présentée et expliquée plus en détails.

3.2 Gestion intelligente du trafic

La gestion du trafic routier s'inscrit dans le domaine des systèmes de transport intelligents (*STI*) (*en anglais Intelligent Transportation Systems (ITS)*) désignent les applications des nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports [40]. On les dit "Intelligents" parce que leur développement repose sur des fonctions généralement associées à l'intelligence : capacités sensorielles, mémoire, communication, traitement de l'information et comportement adaptatif. On trouve les *STI* dans plusieurs champs d'activité : dans l'optimisation de l'utilisation des infrastructures de transport, dans l'amélioration de la sécurité (*notamment de la sécurité routière*) et de la sûreté ainsi que dans le développement des services. L'utilisation des *STI* s'intègre aussi dans un contexte de développement durable : ces nouveaux systèmes concourent à la maîtrise de la mobilité en favorisant entre autres le report de la voiture vers des modes plus respectueux de l'environnement. Ils font l'objet d'une compétition économique serrée au niveau mondial.

Ainsi, les *STI* visent à proposer des outils et modèles afin de gérer les aléas du trafic routier, ceci par le biais ou non d'équipements réactifs dits dynamiques. L'application de tels systèmes va avoir de multiples objectifs.

En premier lieu, ces derniers sont majoritairement conçus pour fluidifier et gérer le trafic routier, notamment au niveau des intersections où ils peuvent directement agir sur les feux de circulation, également au niveau de la politique de stationnement, de l'information de l'utilisateur à tout niveau, et de l'utilisation de stratégies particulières afin de gérer les situations de danger.

En second lieu, ces systèmes vont agir de manière plus ou moins directe sur des enjeux modernes tels que la pollution, en réduisant l'émission de gaz à effet de serre (*conséquence d'une régulation cohérente du trafic*).

3.3 Modélisation du trafic routier urbain

Un réseau routier est conçu afin de permettre à ses usagers de se déplacer d'un point à un autre. Dans ce contexte, il est composé d'un ensemble de routes avec plus ou moins de voies, en fonction des zones d'activités et des lieux d'habitation. Les croisements entre les routes étant inévitables en milieu urbain, de par leur concentration, des intersections

permettent de gérer les flux de véhicules entrant en conflit, pour leur sécurité et afin d'éviter les inter-blocages et de permettre aux automobilistes de changer de route. Ces intersections, ou dans certains cas des carrefours giratoires, régulent le trafic et appliquent généralement des règles de priorité à droite ou sont équipés de feux de circulation pour gérer les situations particulièrement dangereuses. Le réseau routier urbain peut donc être vu comme étant une collection d'intersections, liées les unes aux autres par des routes, auxquelles peuvent venir se greffer des éléments opérationnels (*panneaux, feux de circulation, etc...*).

- **La voie** : c'est le chemin, la route, par laquelle on se rend d'un lieu à un autre. C'est un espace aménagé pour se déplacer en ville (*voie urbaine*) entre les localités ou en milieu rural (*routes*). Les voies de communication sont par conséquent les moyens de liaison à travers l'espace. Elle permet de circuler dans les deux sens [41].
- **La route** : itinéraire à suivre pour aller d'un endroit à un autre. C'est une voie carrossable (*où peuvent circuler des voitures.*) Elle permet à l'homme de se déplacer de chez lui pour pénétrer d'autres régions plus ou moins lointaines. La route est caractérisée par sa longueur, son nombre de voies, ainsi que par les sens de circulation.
- **Le carrefour giratoire (*rond-point*)** : lieu où se croisent plusieurs voies. Les carrefours réduisent la capacité des voies, sauf s'ils sont aménagés à niveaux séparés [41].
- **L'intersection** : une intersection est le lieu de croisement d'au moins deux routes [42] (*voir Figure 3.1*). Un mouvement est défini par son origine et sa destination. Un courant de mobile est l'ensemble des mouvements de véhicules qui proviennent de la même branche d'accès, à savoir la même origine. Ils sont admis simultanément sans conflit. Certaines voies peuvent être dédiées à un mouvement particulier du courant, comme par exemple les mouvements de tourne-à-gauche. Une intersection peut revêtir plusieurs schémas relatifs à la géométrie de l'infrastructure et aux règles de franchissement. Cependant, dans chaque intersection nous pouvons identifier trois zones fonctionnelles :
 - **Zone de conflit** : il s'agit de l'espace de croisement des routes. Autrement dit, c'est la ressource critique partagée par tous les véhicules qui traversent l'intersection.

- Zone de stockage : En amont de la zone de conflit, elle est l'entrée empruntée par les véhicules.
- Zone de sortie : En aval de la zone de conflit, elle permet le soulagement de cette zone.

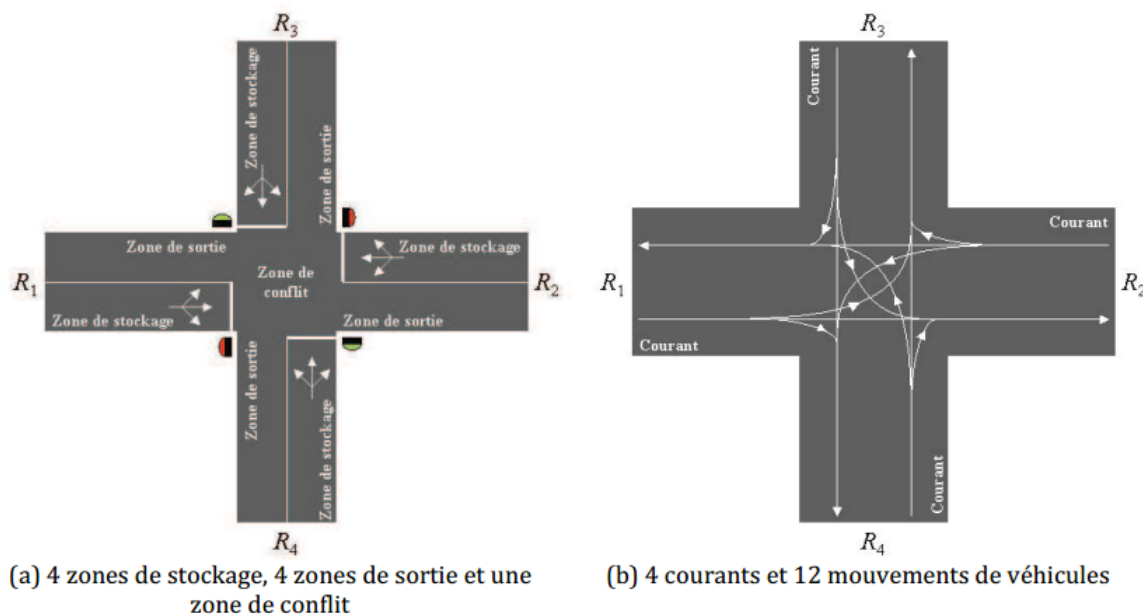


FIGURE 3.1 – Intersection à quatre branches avec mouvement tourne à gauche, à priorité à droite.

3.4 Relation demande vitesse-débit

La notion de débit de trafic est une fonction importante qui est liée à la vitesse et la densité de circulation des véhicules. Elle se calcule à partir de l'équation suivante :

$$\text{debit} = \frac{\text{vitesse}}{\text{densite}} \quad (3.1)$$

Le débit augmente en fonction de la vitesse et de la densité des véhicules.

Cependant, plus la densité est élevée, plus il y a d'interactions entre les voitures, plus la congestion augmente et plus le débit diminue. Cela met en relation la capacité de la route, la demande des usagers, la vitesse de ceux-ci et le débit résultant. Dans une situation de trafic fluide, lorsque les véhicules sont peu nombreux, ils peuvent se déplacer à la vitesse désirée sans problème. Cette vitesse varie en fonction des performances de chaque

véhicule, des caractéristiques de la route, des conditions atmosphériques et est limitée par la vitesse légale. Bien entendu, la vitesse diminue à mesure que la circulation s'intensifie. Ainsi, une augmentation de la demande entrainera d'abord une légère diminution puis, progressivement, une diminution plus forte de la vitesse instantanée.

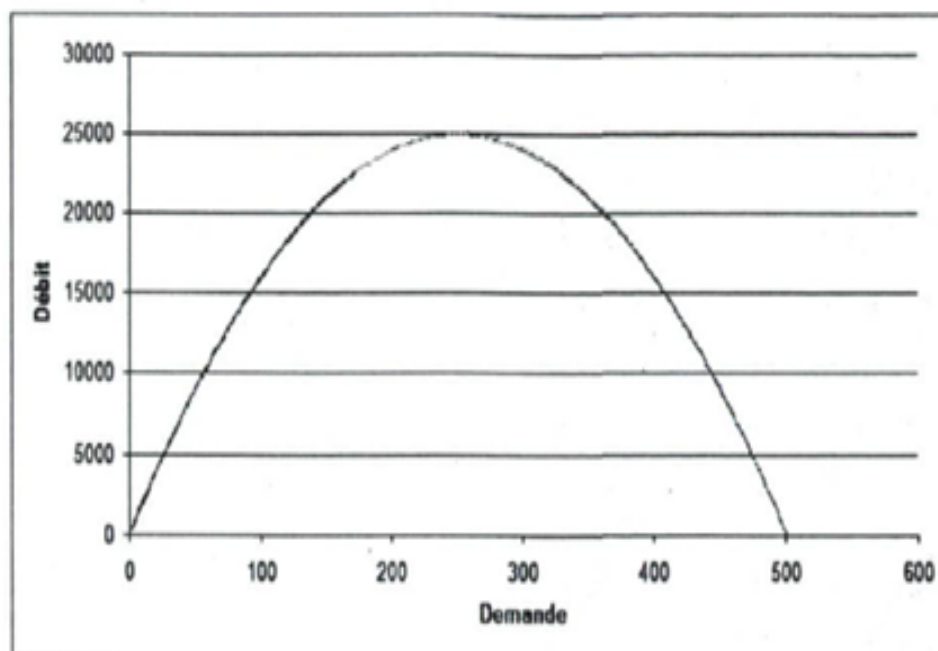


FIGURE 3.2 – Débit en fonction de la demande (*Nombre de véhicules pour une période donnée*).

3.5 Impact d'encombrement sur le temps

Si on rajoute à une circulation un petit accident ou bien un véhicule qui tombe en panne, les conducteurs qui à haute vitesse sont obligés de réduire leur vitesse et ralentir, Ils entraînent ainsi une réaction en chaîne provoquant un encombrement.

En effet, ce dernier contribue à augmenter le temps des automobilistes passés dans les files d'attente. La figure 3.4 montre l'évolution du temps de déplacement et le taux d'encombrement en fonction de la vitesse, ainsi nous remarquons que le pourcentage de taux d'encombrement augmente avec la diminution de la vitesse (*par exemple, il arrive à un pourcentage de 95% quand la vitesse est 20 km/h*), pour le temps nous touchons aussi une augmentation avec l'augmentation du taux et la diminution de la vitesse.

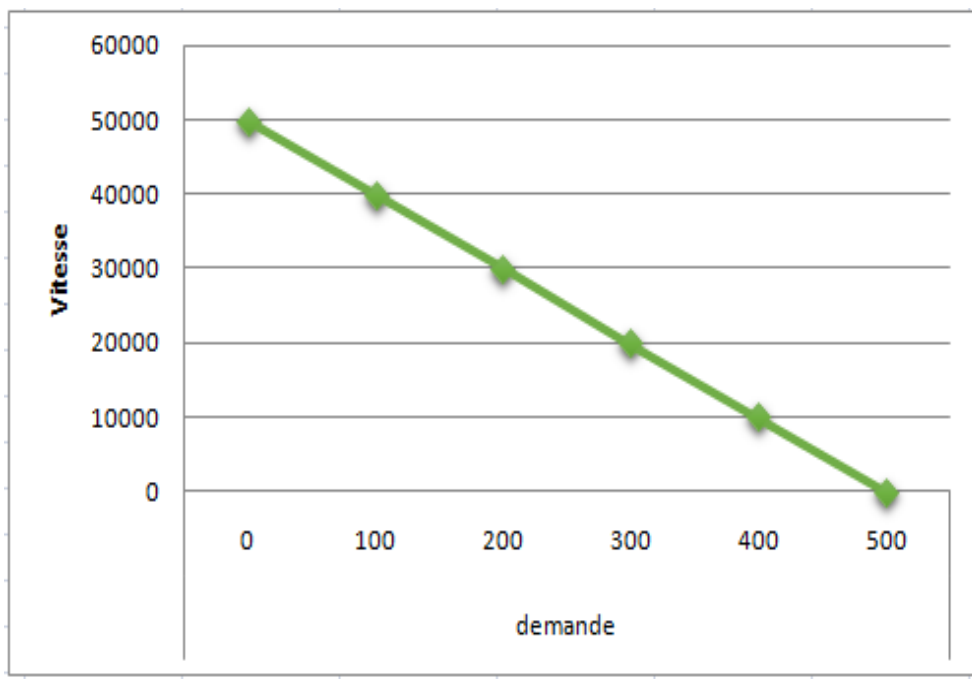


FIGURE 3.3 – Vitesse en fonction de la demande.

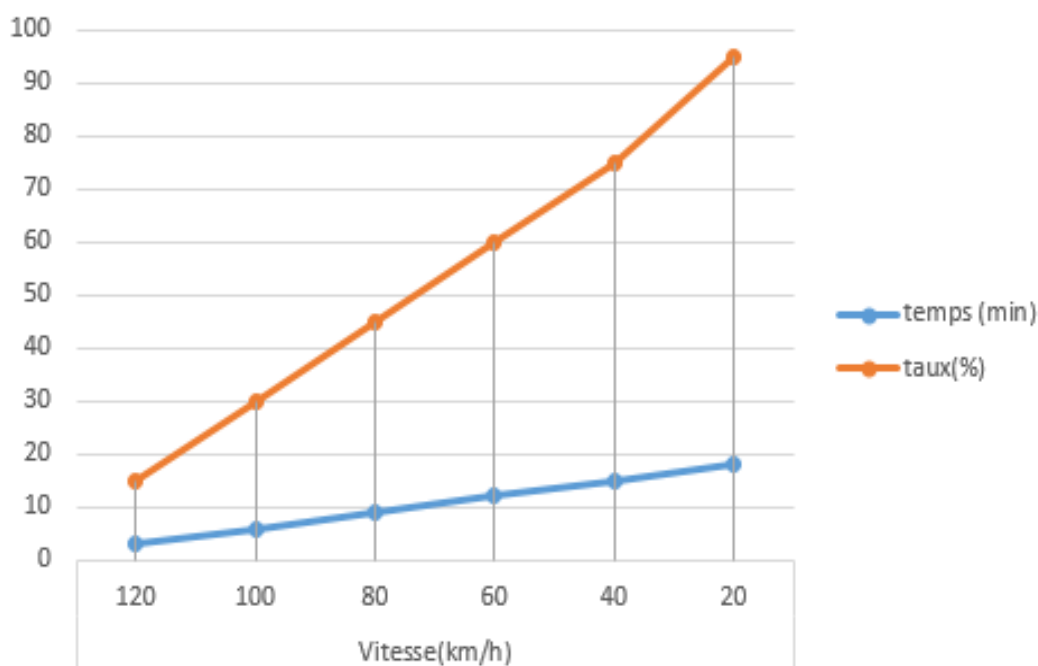


FIGURE 3.4 – Temps en fonction de taux d’encombrement et vitesse.

3.6 Approche proposée

L’optimisation des feux de signalisation est une tâche complexe. Certes, il faut avoir le plus d’informations possible sur l’utilisation du réseau routier pour pouvoir décider de

la programmation des feux. Le programme approprié qui définit les séquences des feux et leurs durées dans de multiples intersections d'un système de transport intelligent doit prendre en considération divers facteurs, tels que :

- **La réduction du temps d'attente des utilisateurs** : cela revient à limiter le taux de la famine.
- **La fluidité** : cela veut dire gérer le problème de l'aspect dynamique de l'environnement. Le flux de véhicules et la demande varient en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et de la période de l'année.
- **La priorisation** : spécialement véhicules des services d'urgence à l'aide des capteurs sans fil tel que : les véhicules de secours.

3.6.1 Démarche à suivre

Notre proposition a pour objectif de réduire le problème de la congestion et ce grâce à l'optimisation des feux de signalisation en se basant sur la communication véhicule-à-infrastructure (*V2I*), la communication entre diverses intersections, prenant en compte plusieurs facteurs (*gestion de la famine, gestion des véhicules prioritaires*), l'algorithme de Dijkstra pour trouver le plus court chemin et un algorithme pour la gestion des feux tricolores intelligents (*feux tricolores dynamiques*).

En plaçant un contrôleur spécifique dans chaque intersection, celui-ci sera susceptible de gérer au mieux les feux de signalisation.

L'infrastructure est munie d'un système de communication sans fil (*les contrôleurs peuvent donc recevoir des informations de la part des capteurs placés sur les bordures des chaussées*) et si d'autant plus les véhicules sont munis de systèmes GPS cela ne serait que plus avantageux. Grâce à ces informations, les détecteurs placés dans les contrôleurs des intersections doivent calculer le nombre de véhicules passés par chaque intersection et aussi la stratégie optimale des feux pour améliorer la fluidité du trafic au niveau de leurs propre intersection et doivent par la suite communiquer entre eux (*entre les intersections*) afin d'optimiser le flux global du trafic et donner ainsi le meilleure chemin au véhicule.

3.7 Architecture de réseau routier proposé

Nous considérons le modèle de réseau routier illustré sur la figure ci-dessous (*Figure 3.5*). Chaque route est avec double sens. Comme il contient des intersections qui sont composées des directions différentes (*deux intersections qui sont importantes la première nommée A et la deuxième B*). Chaque direction contient deux voies. Le véhicule tournant à gauche utilise la voie la plus à gauche et l'autre voie concerne les véhicules allant tout droit ou à droite.

Chaque intersection dispose d'un contrôleur qui définit et applique les séquences de feux appelées cycle, des feux tricolores qui contrôlent la circulation des véhicules, et aussi d'un capteur dans chaque direction et à coté de chaque feu, qui compte le nombre des véhicules qui passent dans chaque période de feu vert (*quand un véhicule entre à une nouvelle direction le capteur incrémente le nombre de véhicules et quand ce dernier sort, il doit faire décrémente*).

Dans notre scénario, à chaque fois qu'un véhicule qui se trouve dans le point *D* veut se déplacer vers un point précis; il demande au contrôleur de point *A* de lui donner le plus court chemin à suivre. Après le contrôleur (*infrastructure*) de point *A* communique avec les autres contrôleurs (*C, E et B*) et il demande de lui donner des informations concernant les véhicules partant dans leurs directions. Pour qu'une intersection puisse envoyer des informations à ses voisines, il serait judicieux d'identifier le nombre de véhicules dirigeant vers les intersections voisines.

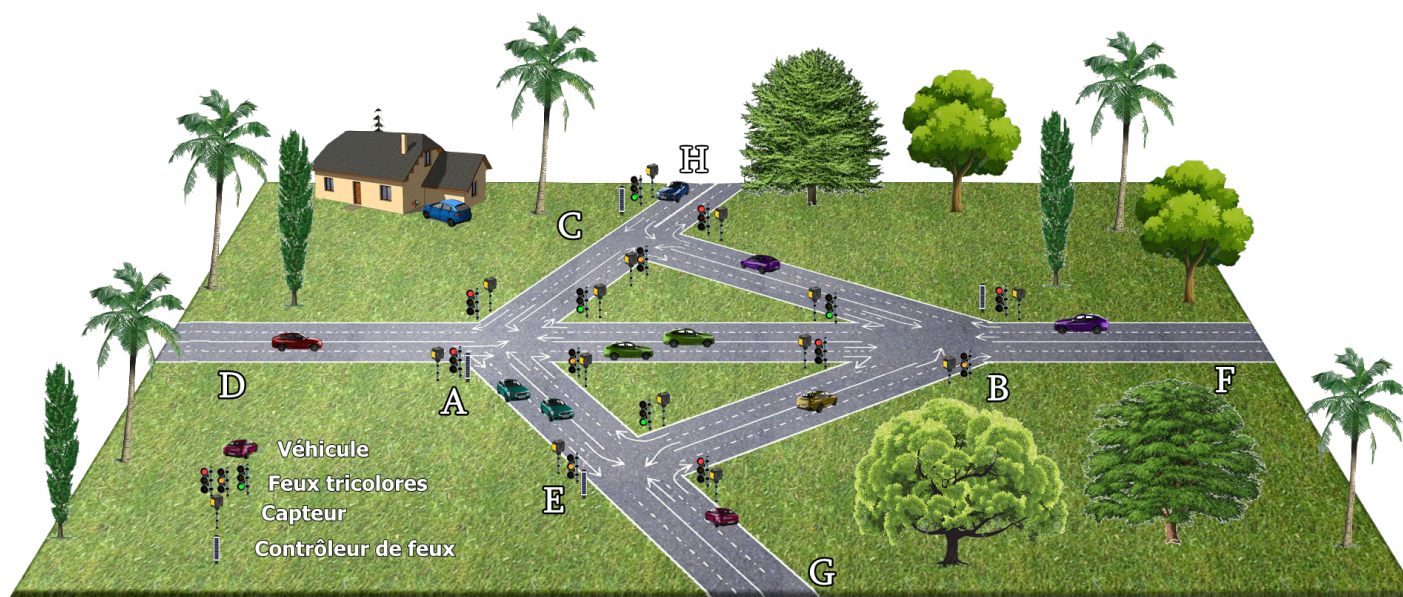


FIGURE 3.5 – Réseau routier proposé.

3.7.1 Communication véhicule-à-infrastructure (V2I)

Le mode véhicule à infrastructure (V2I) est un modèle de communication qui permet aux véhicules de partager des informations avec les composants prenant en charge le système routier d'un pays.

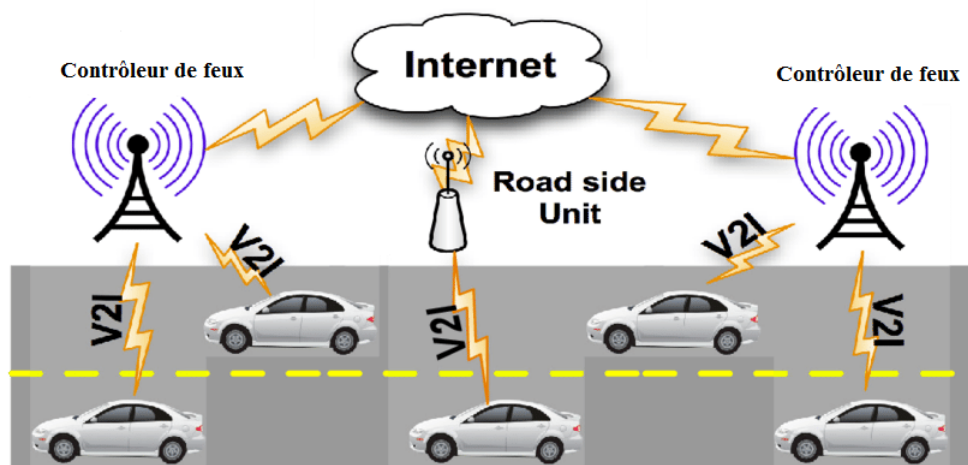


FIGURE 3.6 – Communication V2I.

Dans un système de transport intelligent (ITS), les capteurs V2I peuvent capturer des données d'infrastructure et fournir aux voyageurs des conseils en temps réel sur des problèmes tels que l'état des routes, les embouteillages, les accidents et la disponibilité

de places de stationnement. Dans notre cas (comme il est présenté dans la figure 3.5) le véhicule rouge qui se positionne dans le point D envoie un message au contrôleur (*infrastructure*) de point A , exemple : "Je veux aller au point F (région F) donne-moi le plus court chemin pour le suivre!".

3.7.2 Communication entre les intersections

Permet la communication entre deux intersections adjacentes par l'envoi des messages par un réseau wifi entre les contrôleurs où ces derniers vont vérifier l'état de route qui relie les deux intersections, afin de permettre aux véhicules le passage .

3.7.3 Algorithme de Dijkstra

Nous avons choisi Dijkstra car avec cet algorithme nous pouvons nous arrêter dès que le point d'arrivée devient la case à traiter puisque le chemin que nous avons construit jusque là est un chemin minimal.

Le système de marque empêche l'algorithme de revenir en arrière. Il améliore ainsi sa performance.

1. **Algorithme de Dijkstra classique :** Publié en 1959, l'algorithme de Dijkstra[43] est une alternative à celui de Floyd et plus complexe, mais également beaucoup plus rapide. Il n'est valable que pour les graphes à évaluations positives ou nulles, qui ne contiennent donc pas de circuits négatifs. A chaque itération, un sommet x reçoit sa distance par rapport au sommet de départ définitive, nous disons qu'il est marqué.

L'algorithme de Dijkstra est un algorithme de type glouton : à chaque nouvelle étape, on traite un nouveau sommet. Reste à définir le choix du sommet à traiter, et le traitement à lui infliger.

Tout au long du calcul, on va donc maintenir deux ensembles :

- C , l'ensemble des sommets qui reste à visiter, au départ $C=S$ -source.
- D , l'ensemble des sommets pour lequel on connaît déjà leur plus petite distance à la *source*, au départ $D = source$.

L'algorithme se termine lorsque C est vide.

Pour chaque sommet s dans D , on conservera dans un tableau "*distances*" le poids du plus court chemin jusqu'à la *source*, et dans un tableau "*parcours*" le sommet p

qui le précède dans un plus court chemin de la *source* à s . Ainsi, pour retrouver un chemin le plus court, il suffira de remonter de prédécesseur en prédécesseur jusqu'à la *source*, ce qui peut se faire grâce à un unique appel récursif.

Algorithme 1 : Algorithme de Dijkstra classique

```

1 : Initialiser  $D$  à source
2 : Initialiser  $C$  à  $S - \{source\}$  : l'ensemble des sommets non fixés
3 :  $distances[source] = 0$ 
4 :  $parcours[source] = source$ 

5 : Répéter
6 : Etape1 : Chercher sommet  $s$  non fixé de distance minimale
7 :     Si  $distances[s] < +\infty$ 
8 :         Ajouter  $s$  dans  $D$ 
9 :         Supprimer  $s$  de  $C$ 
10 :    Fin Si
11 : Pour tous les sommets  $t$  de  $C$  Faire
12 :     Si  $distances[s] + F(s,t) < distances[t]$  Alors
13 :          $distances[t] = distances[s] + F(s,t)$ 
14 :          $parcours[t] = s$ 
15 :     Fin Si
16 : Fin Pour
17 : Si  $C$  non vide Alors retour à l'étape 1
18 : Sinon fin

```

2. Appliquer l'algorithme de Dijkstra sur le réseau routier proposé

L'algorithme de Dijkstra est l'un des meilleurs algorithmes pour le calcul de plus court chemin dans un graphe où les poids sont positifs.

Dans notre cas on applique cet algorithme en terme de vitesse maximale, distance et on ajoute un taux d'encombrement qui est obtenu en divisant le nombre de véhicules par la capacité de tronçon, il s'agit donc de nombre moyen de véhicules.

Vocabulaire des graphes	Vocabulaire routier
Graphe (pondéré)	Réseau routier.
Sommet ou nœud	Ville, ou intersection de routes
Arête	Route
Arc	Route à sens unique
Poids	$durée = (distance / vitesseMaximale) * (tauxEncombrement)$

TABLE 3.1 – Tableau des vocabulaires

On va donc maintenir deux ensembles :

- R , l'ensemble des intersections qui reste à visiter, au départ $R=S-source$.
- T , l'ensemble des intersections pour lequel on connaît déjà leur plus petite durée à la *source*, au départ $T= source$.

Le principe de cet algorithme est de calculer le plus court chemin en changeant le poids des arêtes de l'algorithme original à :

$$duree = \frac{distance}{vitesseMaximale} \cdot tauxEncombrement \quad (3.2)$$

(plus la valeur de durée de source à destination est petite, plus le chemin est le meilleur), et aussi d'ajouter dans l'algorithme un point destination (l'algorithme s'arrête dès que le point destination est trouvé). Avec cette optimisation on va trouver le plus court chemin de point D vers le point d'arrivé souhaité.

Initialisation :

Au début de l'algorithme, le chemin le plus court connu entre la *source* (point de départ D) et chacun des intersections (A, E, C, B) est le chemin direct, avec une arête de poids infini, s'il n'y a pas de liaison entre les deux intersections. On initialise donc le tableau "*Durée*" par les poids des arêtes (les durées de déplacement) reliant la *source* D à chacun des intersections, et le tableau "*Parcours*" par *source* pour tous les sommets (*intersections*).

1^{ere} Étape :

On suppose avoir déjà traité i intersections, "*Parcours*" et "*Durée*" contiennent respectivement les poids et les prédécesseurs des plus courts chemins pour chacun des sommets (*intersections*) déjà traités (*visités*). Soit $C(s,t)$ la valeur de durée

de déplacement entre deux intersections $[s,t]$ tel que :

$$C(s,t) = \frac{\text{distance}}{\text{vitesseMaximale}} \cdot \text{tauxEncombrement} \quad (3.3)$$

Soit s le sommet de R (*intersection pas encore visitée*) réalisant le minimum de $Durée[s]$. On supprime s de R et on l'ajoute à T . Reste à mettre à jour les tableaux "*Durée*" et "*Parcours*" pour les intersections t reliés directement à s par une route à sens unique comme suit :

si $Durée[s] + C(s,t) < Durée[t]$, alors on remplace $Durée[t]$ par $Durée[s] + C(s,t)$ et $Parcours[t]$ par s .

$(n - 2)^{eme}$ étape :

Au départ, il y a $(n-1)$ intersections à visiter, mais comme on le verra ci-après, la dernière étape est inutile puisqu'elle n'apporte rien. Ainsi, dès la $(n - 2)^{eme}$ étape, "*Durée*" et "*Parcours*" contiennent toute l'information nécessaire pour trouver des plus courts chemins de la source à chacun des autres sommets (*intersections ou régions*) :

— $Durée[s]$ est la durée de plus court chemin de la source D à s , dans ce cas elle prend la valeur de :

$$Duree = \frac{\text{distance}}{\text{vitesseMaximale}} \cdot \text{tauxEncombrement} \quad (3.4)$$

— $Parcours [t]$ est le prédécesseur de s dans un plus court chemin de la source D à s .

— *destination* est le nœud d'arrivé souhaité par l'utilisateur.

Algorithme 2 : Algorithme de Dijkstra amélioré

```

1 : Initialiser  $T$  à source
2 : Initialiser  $R$  à  $S - \{ \textit{source} \}$  : l'ensemble des intersections non visitées
3 :  $Durée[\textit{source}] = 0$ 
4 :  $Parcours[\textit{source}] = \textit{source}$ 
5 : Répéter
6 : Etape1 : Chercher une intersection  $s$  non fixé de distance minimale
7 :     Si  $Durée[s] < +\infty$ 
8 :         Ajouter  $s$  dans  $T$ 
9 :         Supprimer  $s$  de  $R$ 
10 :    Fin Si
11 : Pour tous les intersections  $t$  de  $R$  Faire
12 :     Si  $Durée [s] + C(s,t) < Durée [t]$  Alors
13 :          $Durée [t] = Durée[s] + C(s,t)$ 
14 :          $Parcours [t] = s$ 
15 :     Fin Si
16 : Fin Pour
17 : Si ( $R$  non vide et  $s \neq \textit{destination}$ ) Alors
18 :     retour à l'Etape1
19 : Sinon
    Fin

```

3.7.4 Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores

La gestion dynamique c'est la gestion des intersections (*carrefours*) qui dépend sur l'utilisation des capteurs (*contrôleurs dans la figure 3.7*) :

Variables	Désignations
nbrV	nombre de véhicules dans chaque tronçon.
étatFeu	état de feu tricolore (rouge, jaune, vert)
directionV	la direction qu'un véhicule veut la prendre (aller tout droit, tourner à droite ou tourner à gauche) .

TABLE 3.2 – Tableau de notations pour l'algorithme des feux tricolores.

La gestion des carrefours ne dépend pas du temps pour allumer les feux tricolores mais du nombre des véhicules utilisant la route dans chaque branche (tronçon)

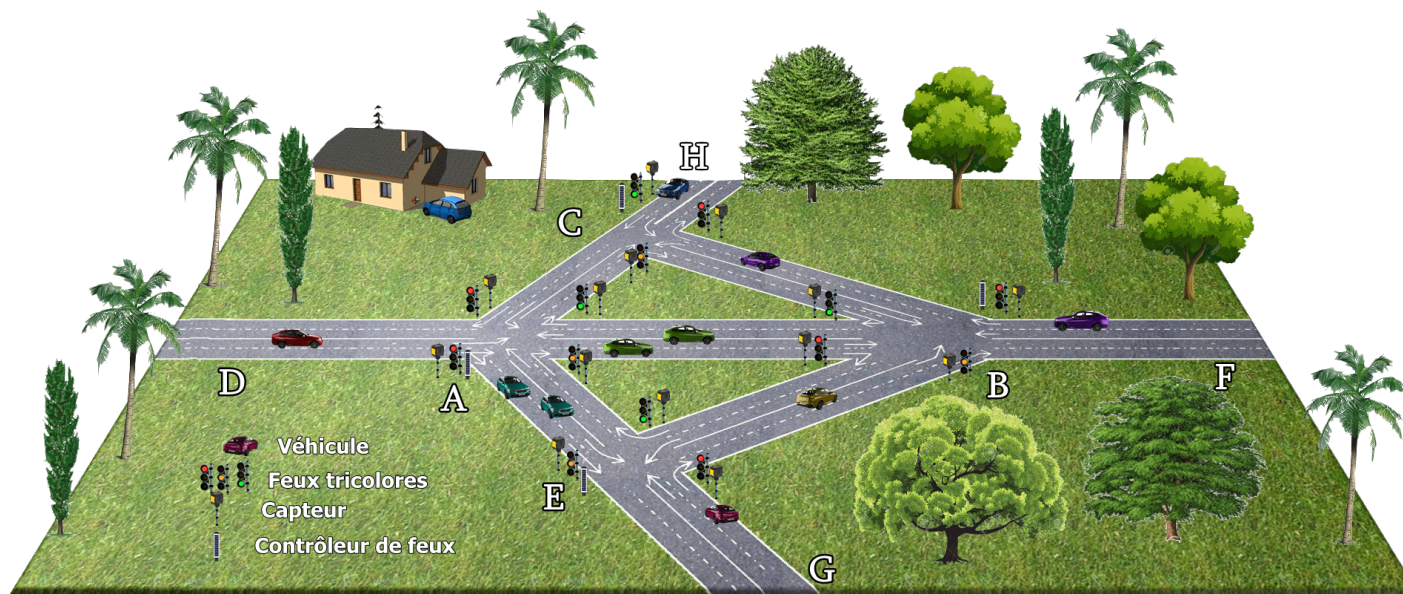


FIGURE 3.7 – Illustration des feux tricolores et des contrôleurs

comme représente les algorithmes ci-dessous (Algorithme 3, 4, 5 et 6) :

Algorithme 3 : Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores pour l'intersection A

```

1 : Si (nbrV_DA > (nbrV_EA et nbrV_BA et nbrV_CA)) Alors
2 :     étatFeu_DA = vert
3 :     étatFeu_EA = rouge
4 :     étatFeu_BA = rouge
5 :     étatFeu_CA = rouge
6 : Sinon Si (nbrV_EA > (nbrV_DA et nbrV_BA et nbrV_CA )) Alors
7 :     étatFeu_EA = vert
8 :     étatFeu_DA = rouge
9 :     étatFeu_BA = rouge
10 :    étatFeu_CA = rouge
11 : Sinon Si (nbrV_BA > (nbV_CA et nbV_DA et nbV_EA)) Alors
12 :    étatFeu_BA = vert
13 :    étatFeu_CA = rouge
14 :    étatFeu_DA = rouge
15 :    étatFeu_EA = rouge
16 : Sinon Si (nbrV_CA > (nbrV_BA et nbrV_DA et nbrV_EA )) Alors
17 :    étatFeu_CA = vert
18 :    étatFeu_DA = rouge
19 :    étatFeu_BA = rouge
20 :    étatFeu_EA = rouge
    
```

Algorithme 4: Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores pour l'intersection B

```

1 : Si (nbrV_AB > (nbrV_EB et nbV_CB)) Alors
2 :     étatFeu_AB = vert
3 :     étatFeu_EB = rouge
4 :     étatFeu_CB = rouge
5 : Sinon Si (nbrV_FB > (nbrV_CB et nbrV_EB)) Alors
6 :     étatFeu_FB = vert
7 :     étatFeu_CB = rouge
8 :     étatFeu_EB = rouge
9 : Sinon Si (nbrV_EB > (nbV_FB et nbV_CB et nbV_AB)) Alors
10 :    étatFeu_EB = vert
11 :    étatFeu_FB = rouge
12 :    étatFeu_CB = rouge
13 :    étatFeu_AB = rouge
14 : Sinon Si (nbrV_CB > (nbrV_FB et nbrV_EB et nbV_AB)) Alors
15 :    étatFeu_CB = vert
16 :    étatFeu_FB = rouge
17 :    étatFeu_EB = rouge
18 :    étatFeu_AB = rouge

```

Algorithme 5: Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores pour l'intersection C

```

1 : Si (nbrV_AC > (nbrV_BC et nbV_HC)) Alors
2 :     étatFeu_AC = vert
3 :     étatFeu_BC = rouge
4 :     étatFeu_HC = rouge
5 : Sinon Si (nbrV_BC > (nbrV_AC et nbrV_HC)) Alors
6 :     étatFeu_BC = vert
7 :     étatFeu_AC = rouge
8 :     étatFeu_HC = rouge
9 : Sinon Si (nbrV_HC > ((nbV_BC) et (directionV_HC = aller tout
droit)))Alors
10 :    étatFeu_HC = vert
11 :    étatFeu_BC = rouge
12 : Sinon Si (directionV_HC = tourner à gauche) et (nbrV_HC > (nbrV_BC
et nbrV_AC) Alors
13 :    étatFeu_HC = vert
14 :    étatFeu_BC = rouge
15 :    étatFeu_AC = rouge

```

Algorithme 6: Algorithme de gestion dynamique des feux tricolores pour l'intersection E

```

1 : Si (nbrV_AE > ((nbrV_BE) et (directionV_AE = aller tout droit))) Alors
2 :     étatFeu_AE = vert
3 :     étatFeu_BE = rouge
4 : Sinon Si ((directionV_AE = tourner à gauche) et (nbrV_AE > (nbrV_GE
   et nbrV_BE))) Alors
5 :     étatFeu_AE = vert
6 :     étatFeu_GE = rouge
7 :     étatFeu_BE = rouge
8 : Sinon Si (nbrV_BE > ( nbrV_GE et nbrV_AE)) Alors
9 :     étatFeu_BE = vert
10 :    étatFeu_GE = rouge
11 :    étatFeu_AE = rouge
    Sinon
12 :    étatFeu_GE = vert

```

Pour les véhicules qui veulent tourner à droite, il suffit que la flèche jaune directionnel s'allume.

3.8 Déroulement des algorithmes

3.8.1 Algorithme de Dijkstra

On applique les deux formules suivantes (Table 3.4 et 3.5), pour obtenir le meilleur chemin de point de départ D au point F (*destination*) (*résultat dans le tableau de la figure (3.9)*). : .

$$tauxEncombrement = \frac{nombredevehicules}{capacite} \quad (3.5)$$

$$Duree = \frac{distance}{vitesseMaximale} .tauxEncombrement \quad (3.6)$$

Variables	Description
Dist (km)	distance entre deux points en kilomètre.
Vit (km/h)	vitesse maximale pour chaque tronçon en kilomètre par heure.
T (min)	temps (Dist / Vit) en minute.
Ca	capacité de tronçon.
NbrV	nombre de véhicules dans un tronçon.
Taux	NbrV / Ca .
Durée	$T * \text{Taux}$.

TABLE 3.3 – Tableau de notations

Les tableaux (3.4 et 3.5) illustrent l'évaluation du durée en fonction de taux d'encombrement.

	Dist (km)	Vit (km/h)	T (min)	Ca	NbrV	Taux	Durée
DA	5	60	5	400	324	0.81	4.05
AE	4	50	4.8	280	181	0.64	3.07
EB	4.5	60	4.5	320	250	0.78	3.51
AB	3	40	4.5	260	200	0.76	3.42
AC	3.5	60	3.5	280	90	0.32	1.12
CB	4	60	4	280	75	0.26	1.04
EG	3	50	3.6	260	120	0.46	1.656
CH	3	60	3	260	152	0.58	1.74
BF	4	60	4	300	89	0.296	1.186
FB	4	60	4	280	170	0.6	2.4
BC	4.5	60	4.5	320	100	0.3125	1.406
CA	4	80	3	300	270	0.9	2.7
AD	5	60	5	400	180	0.45	2.25
BA	3.5	60	3.5	300	243	0.81	2.835
BE	4	50	4.8	300	198	0.66	3.168
HC	3	60	3	260	180	0.69	2.07
GE	3	50	3.6	240	160	0.66	2.376
EA	3.5	60	3.5	300	264	0.88	3.08

TABLE 3.4 – Évaluation du durée en fonction de taux d'encombrement (1).

L'algorithme de Dijkstra permet de calculer le plus court chemin entre deux points. On construit tous les chemins optimaux progressivement : on part du point de départ D et on regarde les chemins de taille 1 (*une arête*). On conserve le chemin de longueur minimal car celui-ci ne pourra être amélioré par la suite. On construit ensuite des débuts de chemin et on conserve à chaque fois le plus court d'entre eux (*car ceux là ne pourront être améliorés*). À chaque étape, on traite définitivement un nouveau point, qui est marqué. Une fois tous les points marqués (*visités*), on aura un accès à la longueur des plus courts chemins issus du point de départ D , ainsi qu'aux chemins eux-mêmes.

La figure (3.3) et le tableau de la figure (3.5) illustrent un exemple de fonctionnement de l'algorithme de Dijkstra.

	Dist (km)	Vit (km/h)	T (min)	Ca	NbrV	Taux	Durée
DA	5	60	5	400	140	0.35	1.75
AE	4	50	4.8	280	60	0.21	1.008
EB	4.5	60	4.5	320	310	0.97	4.36
AB	3	40	4.5	260	98	0.37	1.66
AC	3.5	60	3.5	280	85	0.30	1.05
CB	4	60	4	280	198	0.70	2.8
EG	3	50	3.6	260	209	0.80	2.88
CH	3	60	3	260	240	0.92	2.76
BF	4	60	4	300	245	0.816	3.264
FB	4	60	4	280	253	0.9	3.6
BC	4.5	60	4.5	320	267	0.83	3.735
CA	4	80	3	300	153	0.51	1.53
AD	5	60	5	400	345	0.86	4.3
BA	3.5	60	3.5	300	169	0.56	1.96
BE	4	50	4.8	300	245	0.81	3.88
HC	3	60	3	260	246	0.95	2.85
GE	3	50	3.6	240	216	0.9	3.24
EA	3.5	60	3.5	300	126	0.42	1.47

TABLE 3.5 – Évaluation du durée en fonction de taux d'encombrement (2) .

Les étapes suivis pour trouver les résultats présentés dans le tableau précédent 3.9 :

1. Pour la première étape, on remplit la première ligne à l'aide des chemins reliant D à son voisin A . On indique dans le tableau la longueur de l'arête reliant D au sommet A (4.05), et on indique ∞ s'il n'y a pas (encore) de chemin trouvé. On indique également de quel sommet on vient (pour cette étape, on vient toujours de D).
2. On se déplace alors sur le sommet précédemment marqué : le sommet A . On passe alors en revue tous les voisins de A . Ils sont connectés à D par au plus deux chemins : soit un chemin déjà noté dans le tableau, soit un nouveau chemin constitué du chemin déjà noté entre D et A auquel on ajoute une arête.

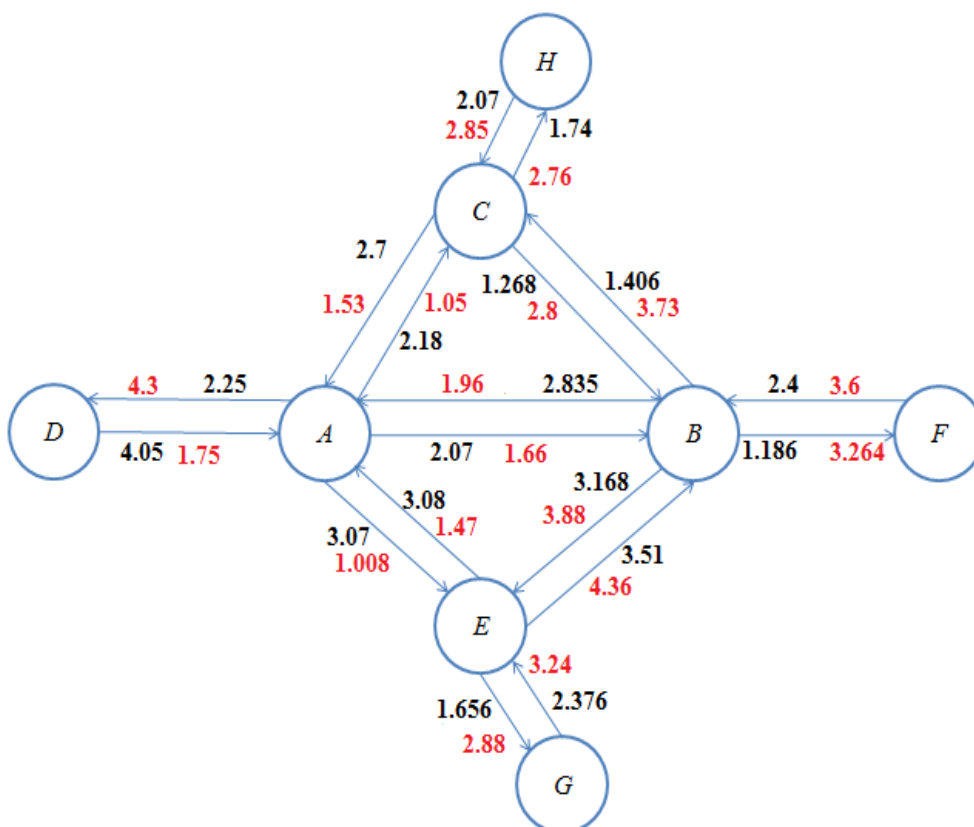


FIGURE 3.8 – Graphe pondéré pour le réseau routier

T (sommets)	Durée []								Parcours []							
	D	A	B	C	E	F	G	H	D	A	B	C	E	F	G	H
D	0	4.05	∞	∞	∞	∞	∞	∞	D	D	-	-	-	-	-	-
	0	1.75	∞	∞	∞	∞	∞	∞	D	D	-	-	-	-	-	-
D, A	0	4.05	7.47	5.17	7.12	∞	∞	∞	D	D	A	A	A	-	-	-
	0	1.75	3.41	2.8	2.758	∞	∞	∞	D	D	A	A	A	-	-	-
D, A, E	0	4.05	7.47	5.17	7.12	∞	8.77	∞	D	D	A	A	A	-	E	-
	0	1.75	3.41	2.8	2.758	∞	5.638	∞	D	D	A	A	A	-	E	-
D, A, B	0	4.05	7.47	5.17	7.12	7.306		∞	D	D	A	A	A	B		-
	0	1.75	3.41	2.8	2.758	6.674			D	D	A	A	A	B		-
D, A, C	0	4.05	6.21	5.17	7.12	7.306		6.91	D	D	C	A	A	B		C
	0	1.75	3.41	2.8	2.758	6.674		5.56	D	D	A	A	A	B		C
D, A, E, B	0	4.05	6.21	5.17	7.12	7.306		6.91	D	D	C	A	A	B	E	
	0	1.75	3.41	2.8	2.758	6.674	5.638		D	D	A	A	A	B	E	
D, A, C, B	0	4.05	6.21	5.17	7.12	6.356		6.91	D	D	C	A	A	B	E	C

FIGURE 3.9 – Déroulement d’algorithme de Dijkstra appliqué sur réseau routier de la figure 3.8

Prenons l'exemple des voisins de A et les voisins des autres sommets jusqu'où on obtient le meilleur chemin :

- le sommet E est relié à A avec une arête de longueur 7.12 et son chemin $D \rightarrow A \rightarrow E$.
- le sommet C est de longueur 5.17 de A .
- le sommet B est relié à A avec un longueur de 7.47, le chemin est $D \rightarrow A \rightarrow B$.
- G est de longueur de 8.77 de $D \rightarrow A \rightarrow E \rightarrow G$.
- le sommet F est relié à B avec une longueur de 7.306, de chemin $D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow F$
- on examine B : on compare 7.47 (longueur du chemin déjà existant) à 6.21, longueur de nouveau chemin possible $D \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B$. Ce dernier est plus court. on inscrit donc 6.21 de C dans la cinquième ligne.
- Enfin, on examine F : on compare l'ancienne longueur (7.306) à 6.356, longueur de nouveau chemin de D à F , $D \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow F$ qui est le plus court chemin et on le marquant dans la dernière ligne.

Donc le meilleur et plus court chemin est : $D \rightarrow A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow F$ avec une longueur de **6.356**.

Pour le deuxième tableau (Table 3.5) on suit les mêmes étapes pour obtenir le plus court chemin $D \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow F$ avec une longueur de **6.674**.

D'après les résultats obtenus dans les deux tableaux précédents (*tableau 3.4 et 3.5*), on conclut que la relation entre le taux d'encombrement et la durée de déplacement entre deux points est une relation corrélation directe et que le taux d'encombrement génère le choix de plus court et meilleur chemin (*Figure 3.9*).

3.8.2 Exemple d'application d'un algorithme de gestion dynamique des feux tricolores

Dans les figures ci-dessous (3.10), les véhicules qui sont au tronçon DA demandent le feu vert pour tourner à gauche, un processus se déclenche pour comparer le nombre de véhicules dans les différentes voies ; S'il trouve que le nombre de véhicules qui sont où tronçon DA est plus grand que les autres tronçons voisins (BA , EA et CA), même si le

temps de feu verts dans ces tronçons n'est pas expiré le contrôleur va activer le feu vert pour DA et désactiver le feu rouge dans les autres cotés.

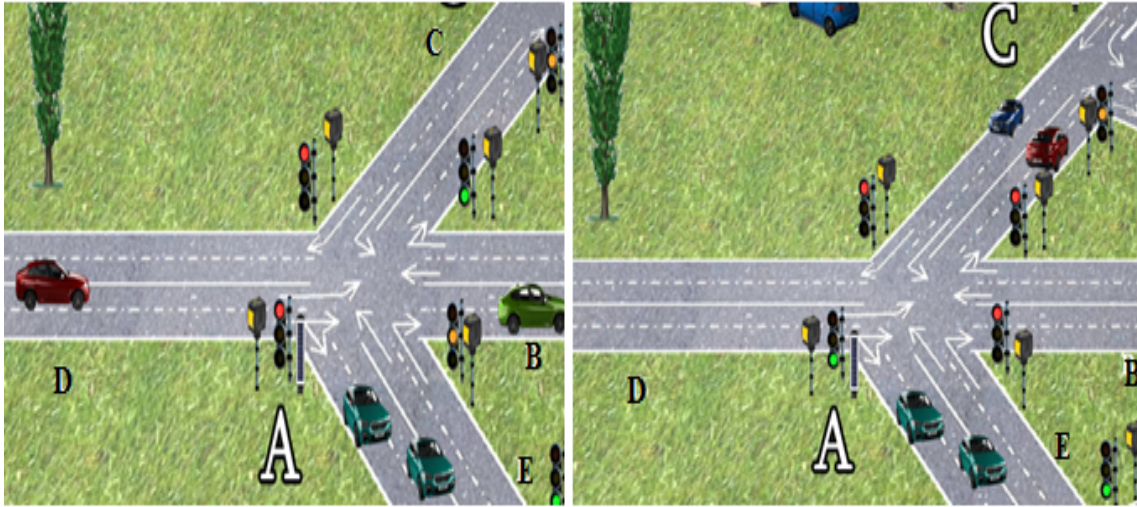


FIGURE 3.10 – Gestion dynamique des feux tricolores appliquée dans l'intersection A

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons adopté une nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores. Nous nous sommes investis dans la recherche d'un moyen permettant d'éviter la congestion.

Nous avons proposé donc une méthode de résolution approchée afin de trouver, en un temps raisonnable une séquence de passage satisfaisante des véhicules pour chaque carrefour. Les algorithmes correspondant ont pour objectif d'assurer une bonne qualité de solution obtenue avec un temps de calcul relativement réduit.

Le prochain chapitre est consacré à l'implémentation des différents algorithmes proposés afin d'évaluer les performances.

Évaluation des performances de la solution proposée

4.1 Introduction

Ce chapitre représente tous les tests majeurs qui ont été faits depuis le début avec leur évaluation et interprétation. Avant d'entrer dans les détails, nous décrivons d'abord notre environnement de travail.

4.2 Langage et environnement utilisé

4.2.1 Langage Java

Java¹ est un langage typé et orienté objet [44]. Il est compilé et basé sur une architecture logicielle très particulière nécessitant une machine virtuelle Java. Il utilise les notions usuelles de la programmation orientée objet : la notion de classe, d'encapsulation, d'héritage, d'interface, de virtualité, de généricité, ... Il est accompagné d'un ensemble énorme de bibliothèques standard couvrant de très nombreux domaines, notamment des bibliothèques graphiques. C'est un langage qui présente d'excellentes propriétés de portabilité du code. Son gros point faible est une relative lenteur, surtout si on le compare à des langages comme le C++. Cependant, ce défaut a été résolu en grande partie par l'introduction de la technologie JIT (compilateur Just-In-Time, en anglais « juste à temps

1. <https://www.java.com/fr/>

»), qui compile le code à la première exécution, permettant une exécution quasiment aussi rapide qu'en C/C++.

4.2.2 Pourquoi Java ?

Java présente beaucoup d'avantages, nous citons quelques-uns :

- **Simple** : cette notion est relative mais par rapport au C++, Java est plus simple à utiliser. En particulier, il n'existe pas de pointeurs explicites et la gestion de la mémoire est transparente pour le programmeur.
- **Robuste et sûr** : le typage des données est extrêmement strict. Aucune conversion de type implicite pouvant provoquer une perte de précision n'est possible. Comme pour les applets, il est en principe impossible d'accéder aux ressources de la machine hôte. Enfin lors de l'exécution, on vérifie que le code généré par le compilateur n'a pas été altéré.
- **Indépendant des architectures matérielles** : le compilateur génère un code universel le "byte-code". un interpréteur spécifique à l'ordinateur hôte appelé «machine-virtuelle» permet l'exécution des programmes. La représentation des données étant indépendante de la machine qui exécute le code, les résultats des calculs sont indépendants de cette machine.
- **Multitâche** : java permet l'exécution en apparence simultanée de plusieurs processus. En réalité on accorde de façon séquentielle un peu du temps processeur à chaque processus. On dit aussi multithread.

4.2.3 Environnement d'exécution

Nous avons choisis l'environnement Eclipse², qui est un environnement de développement intégré (*Integrated Development Environment*) dont le but est de fournir une plate-forme modulaire pour permettre de réaliser des développements informatiques. I.B.M. est à l'origine du développement d'Eclipse qui est d'ailleurs toujours le cœur de son outil Websphere Studio Workbench (*WSW*), lui même à la base de la famille des derniers outils de développement en Java d'I.B.M. Tout le code d'Eclipse a été donné à la communauté par I.B.M afin de poursuivre son développement [45].

2. <https://www.eclipse.org/downloads/.../eclipse-ide-java-developers>

4.2.4 Packages utilisés

La table 4.1 illustre les différents packages utilisés.

Package	Description
java.awt	Créer des interfaces graphiques natives (<i>lourdes</i>).
java.math	Pour les traitement arithmétiques demandant une grande précision.
java.util	Contient des classes utilitaires comme date, collections, modèle événementiel, dates/heures, internationalisation.
javax.swing	Créer des interfaces graphiques (<i>légères</i>).

TABLE 4.1 – Tableau des packages java utilisés.

4.3 Tests et Résultats

Les figures qui suivent décrivent la chronologie des principaux tests réalisés :

La Figure 4.1 représente l'interface graphique de notre scénario et les feux tricolores classiques qui fonctionnent avec le temps, pour tester l'approche proposée dans le chapitre précédent.

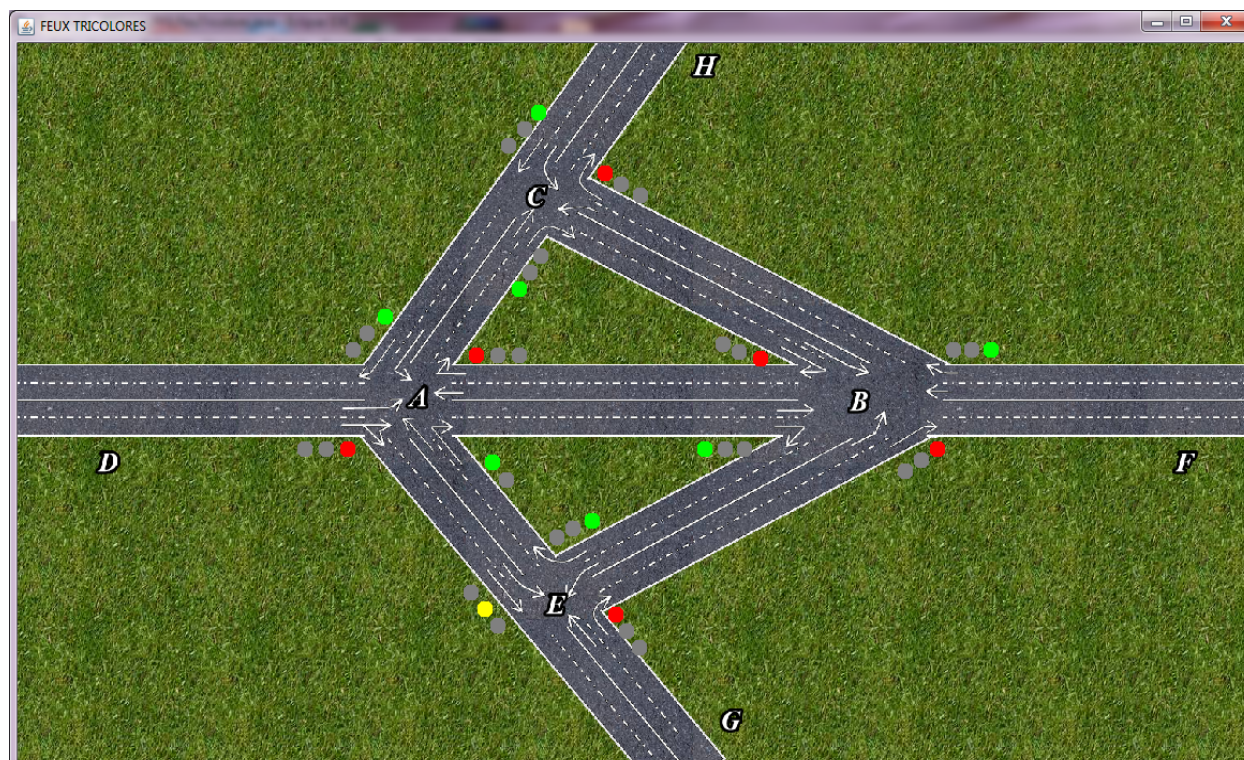


FIGURE 4.1 – Feux tricolores classiques.

Dans l'interface (Figure 4.2), nous avons créé des boutons pour gérer les véhicules entrants et sortants tel que ces boutons désignent le rôle de capteur de calculer le nombre de véhicules dans chaque tronçon.

- Le bouton (V+) permet d'incrémenter le nombre de véhicules dans chaque tronçon.
- Le bouton (V-) permet de décrémenter le nombre de véhicules qui sortent de chaque tronçon.

Nous avons créé des labels pour récupérer le nombre de véhicules entrants, sortants et qui sont dans chaque tronçon.

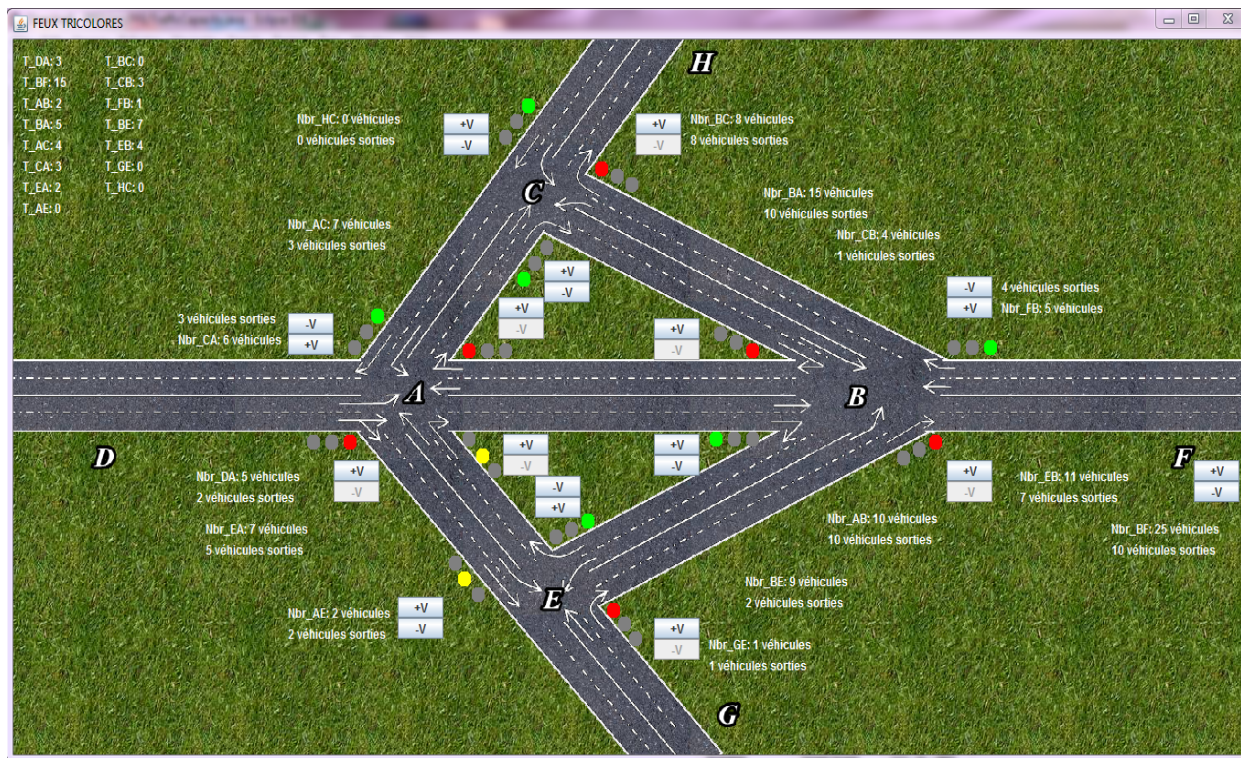


FIGURE 4.2 – Interface de nombre des véhicules.

La Figure 4.3 représente l'exécution de programme qui permet la communication entre véhicules et infrastructure, cette dernière a pour but de montrer le plus court chemin et renvoyer la réponse au véhicule demandeur.

```

<terminated> FeuThreadDijkstra [Java Application] C:\Program Files\Java\jdk-13\bin\javaw.exe (20 nov. 2019 à 23:
*****
*****Véhicule demande le plus court chemin*****
'Je veux aller de point D au point F, donne-moi le meilleur chemin !'
*****
Calcul de durée minimale
*****
Durée minimale de D à A: 3.0
Durée minimale de D à E: 5.777142857142858
Durée minimale de D à C: 4.507692307692308
Durée minimale de D à B: 6.15054945054945
Durée minimale de D à G: 7.106373626373626
Durée minimale de D à H: 5.814835164835165
Durée minimale de D à F: 8.097216117216117
*****
Le meilleur chemin du départ à la destination
*****
Meilleur chemin de D à A: [D, A]
Meilleur chemin de D à E: [D, A, E]
Meilleur chemin de D à C: [D, A, C]
Meilleur chemin de D à B: [D, A, C, B]
Meilleur chemin de D à G: [D, A, E, G]
Meilleur chemin de D à H: [D, A, C, H]
Meilleur chemin de D à F: [D, A, C, B, F]
*****Réponse au véhicule de point D*****
Le meilleur chemin de D à F est: [D, A, C, B, F]

```

FIGURE 4.3 – Communication *V2I*.

Pour la communication entre les infrastructures (*intersections*) se met sous forme de messages qui montrent le nombre de places libres, ainsi un véhicule demande à une intersection de rentrer dans un tel tronçon et avant de lui accepter son entrée, cette dernière envoie un message à l'intersection voisine qui vérifie d'abord s'il reste de places libres dans le tronçon en question sinon elle refuse sa demande et le véhicule change de direction.

```

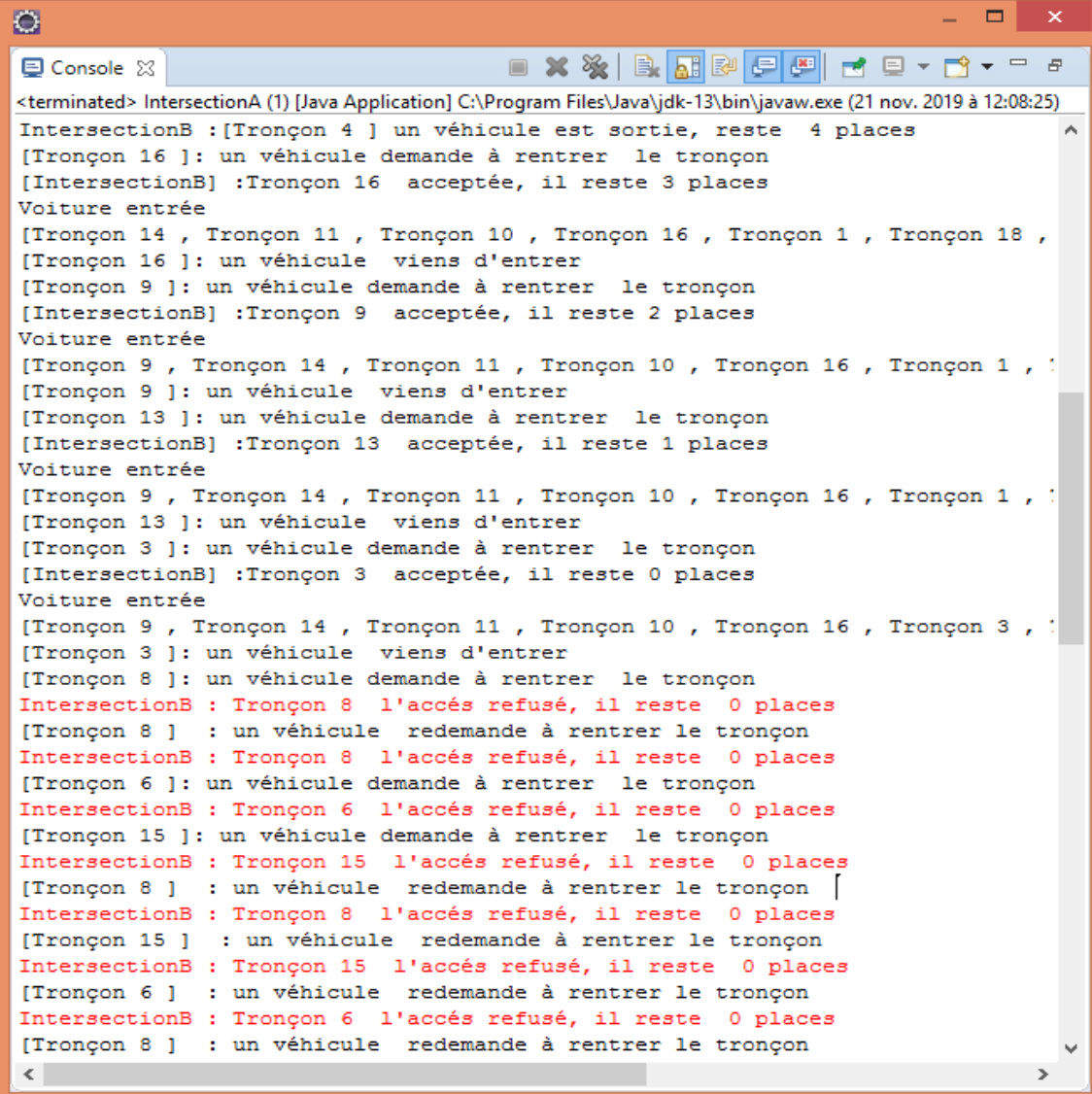
<terminated> IntersectionA (1) [Java Application] C:\Program Files\Java\jdk-13\bin\javaw.exe (21 nov. 2019 à 12:01:50)
[[Tronçon 10 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 10 acceptée, il reste 299 places
Voiture entrée
[Tronçon 10 ]
[Tronçon 10 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 3 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 3 acceptée, il reste 298 places
Voiture entrée
[Tronçon 10 , Tronçon 3 ]
[Tronçon 3 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 18 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 18 acceptée, il reste 297 places
Voiture entrée
[Tronçon 10 , Tronçon 3 , Tronçon 18 ]
[Tronçon 18 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 4 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 4 acceptée, il reste 296 places
Voiture entrée
[Tronçon 4 , Tronçon 10 , Tronçon 3 , Tronçon 18 ]
[Tronçon 4 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 17 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 17 acceptée, il reste 295 places
Voiture entrée
[Tronçon 4 , Tronçon 10 , Tronçon 3 , Tronçon 18 , Tronçon 17 ]
[Tronçon 17 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 5 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 5 acceptée, il reste 294 places
Voiture entrée
[Tronçon 5 , Tronçon 4 , Tronçon 10 , Tronçon 3 , Tronçon 18 , Tronçon 17 ]
[Tronçon 5 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 18 ]: un véhicule demande à sortir
IntersectionB :[Tronçon 18 ] un véhicule est sortie, reste 295 places
[Tronçon 3 ]: un véhicule demande à sortir
IntersectionB :[Tronçon 3 ] un véhicule est sortie, reste 296 places
[Tronçon 3 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 3 acceptée, il reste 295 places
Voiture entrée

```

FIGURE 4.4 – Communication infrastructure à infrastructure

Tel que : Tronçon 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 et 18 sur la Figure 4.4 sont les tronçon DA, AB, AC, AE, EB, EG, CB, CH, BF, FB, HC, BC, GE, BE, EA, CA, BA et AD dans notre scénario.

La Figure 4.5 présente des réponses sous forme de messages de refus envoyés par l'intersection qui reçoit la demande d'entrée à cause de saturation du tronçon, par exemple (*Intersection B : Tronçon 6 l'accès refusé, il reste 0 places*).



```

<terminated> IntersectionA (1) [Java Application] C:\Program Files\Java\jdk-13\bin\javaw.exe (21 nov. 2019 à 12:08:25)
IntersectionB :[Tronçon 4 ] un véhicule est sortie, reste 4 places
[Tronçon 16 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 16 acceptée, il reste 3 places
Voiture entrée
[Tronçon 14 , Tronçon 11 , Tronçon 10 , Tronçon 16 , Tronçon 1 , Tronçon 18 ,
[Tronçon 16 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 9 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 9 acceptée, il reste 2 places
Voiture entrée
[Tronçon 9 , Tronçon 14 , Tronçon 11 , Tronçon 10 , Tronçon 16 , Tronçon 1 ,
[Tronçon 9 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 13 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 13 acceptée, il reste 1 places
Voiture entrée
[Tronçon 9 , Tronçon 14 , Tronçon 11 , Tronçon 10 , Tronçon 16 , Tronçon 1 ,
[Tronçon 13 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 3 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
[IntersectionB] :Tronçon 3 acceptée, il reste 0 places
Voiture entrée
[Tronçon 9 , Tronçon 14 , Tronçon 11 , Tronçon 10 , Tronçon 16 , Tronçon 3 ,
[Tronçon 3 ]: un véhicule viens d'entrer
[Tronçon 8 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 8 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 8 ] : un véhicule redemande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 8 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 6 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 6 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 15 ]: un véhicule demande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 15 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 8 ] : un véhicule redemande à rentrer le tronçon [
IntersectionB : Tronçon 8 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 15 ] : un véhicule redemande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 15 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 6 ] : un véhicule redemande à rentrer le tronçon
IntersectionB : Tronçon 6 l'accès refusé, il reste 0 places
[Tronçon 8 ] : un véhicule redemande à rentrer le tronçon

```

FIGURE 4.5 – Capacité de tronçon saturée.

Les figures (Figure 4.6 et 4.7) représentent les résultats de test d’algorithme du Dijkstra. Nous avons appliqué la formule suivante :

$$Duree = (Temps).(tauxEncombrement) \quad (4.1)$$

Tel que :

$$Temps = \frac{Distance}{Vitesse} \quad (4.2)$$

Et :

$$tauxEncombremment = \frac{nbrVehicules}{capaciteT} \tag{4.3}$$

Pour obtenir le meilleur chemin en termes de distance, vitesse et d'encombrement.

La Figure 4.6 illustre les résultats de deux tests pour le calcul de taux d'encombrement et durée dans chaque tronçon.

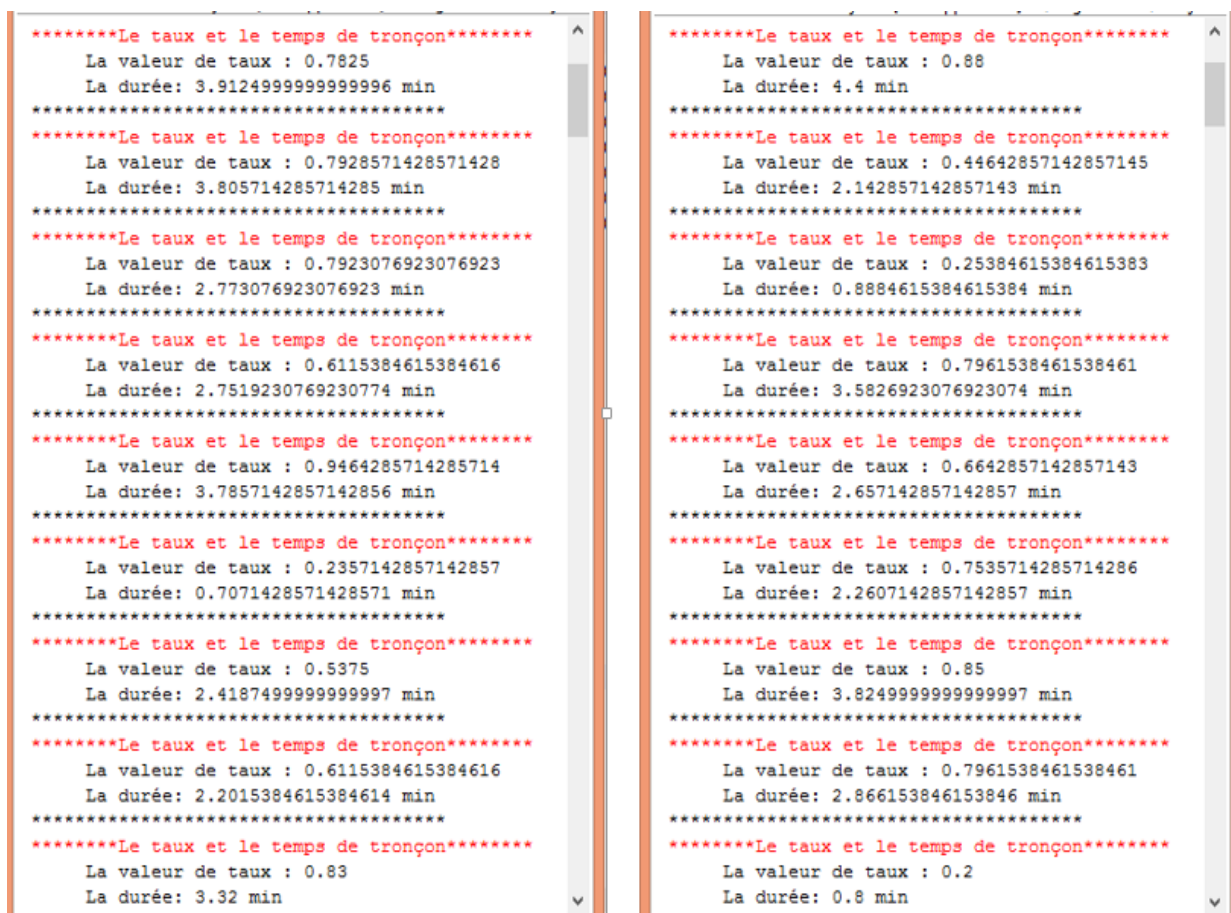


FIGURE 4.6 – Calcul de taux et durée pour chaque tronçon

La Figure 4.7 montre la durée minimale et le meilleur chemin de point du départ D vers les autres points.

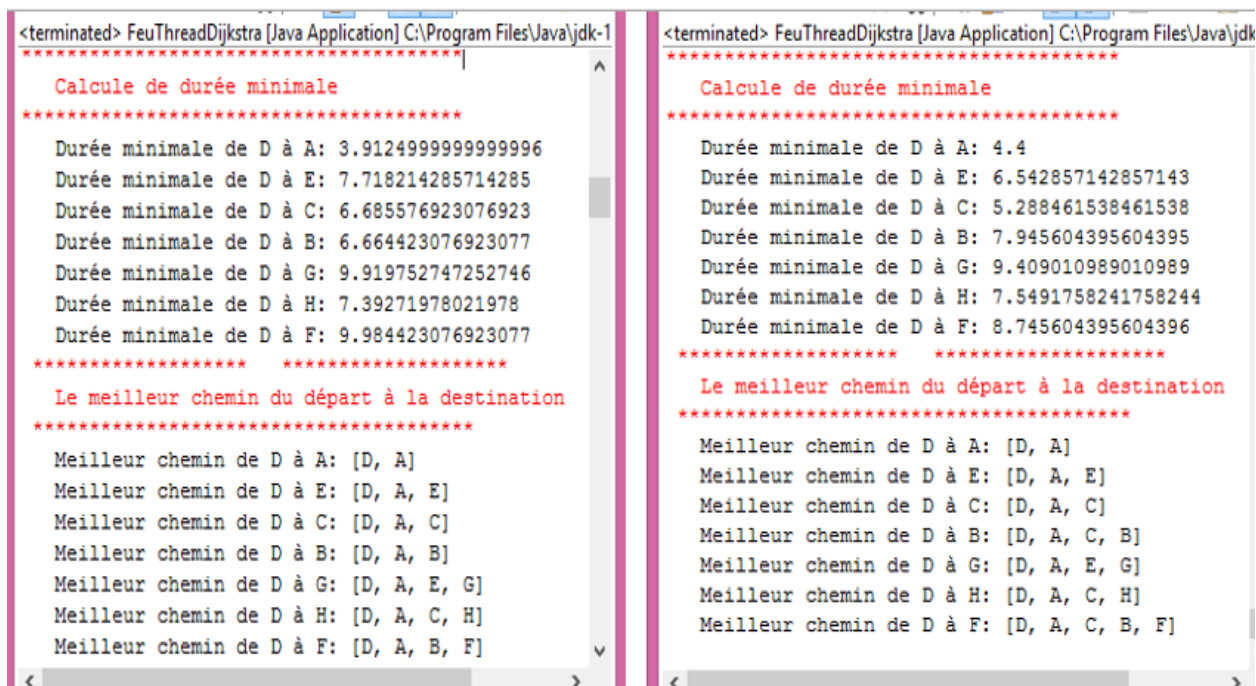


FIGURE 4.7 – Durée et le plus court chemin du point D aux autres points.

La Figure 4.8 illustre la relation entre le taux d’encombrement et la durée de déplacement, en faisant comparaison des deux graphes, nous remarquons que la durée de déplacement augmente avec l’augmentation de taux d’encombrement, car le calcul de la durée est lié au calcul d’encombrement et le temps cela explique la relation de corrélation directe qui existe entre ces paramètres.

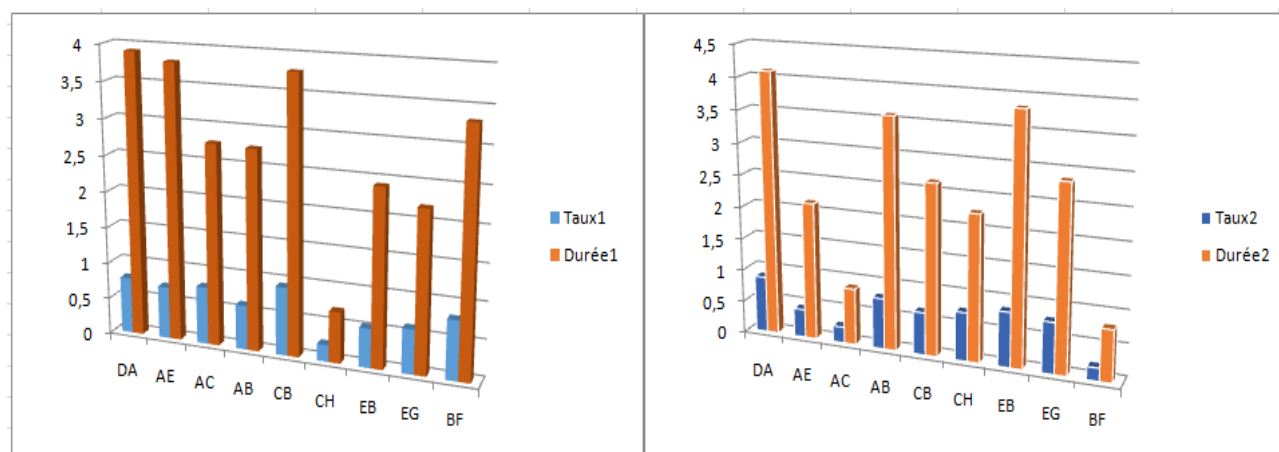


FIGURE 4.8 – Relation entre le taux d’encombrement et la durée de déplacement.

La Figure 4.9 montre l'efficacité de l'algorithme de Dijkstra pour déterminer le plus court et meilleur chemin à fin de réduire la durée de déplacement en utilisant les durées obtenues dans la Figure 4.7, en faisant la comparaison entre les deux graphes, nous remarquons que cet algorithme améliore les résultats dans le graphe qui utilise la durée (Durée 2) montrée dans la figure 4.8, car dans celui ci le taux d'encombrement diminue par rapport à celui de la durée (Durée 1).

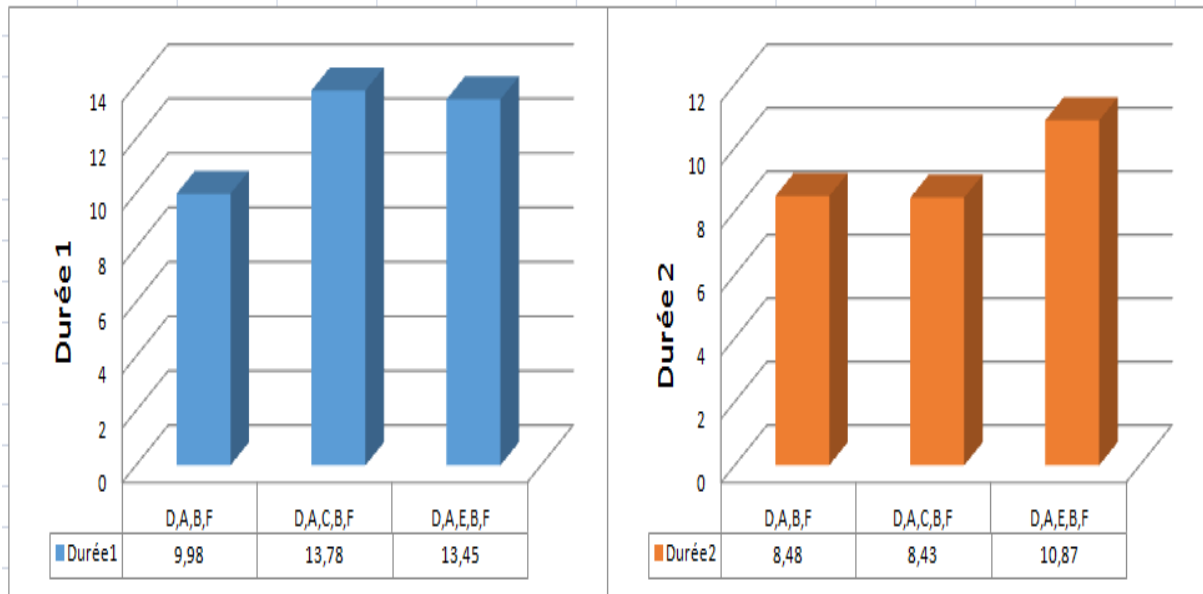


FIGURE 4.9 – Meilleur chemin de D à F.

La Figure 4.10 montre l'amélioration de fonctionnement des feux tricolores. Nous avons gérer ces derniers selon le nombre de véhicules qui demandent le feu tricolore vert.

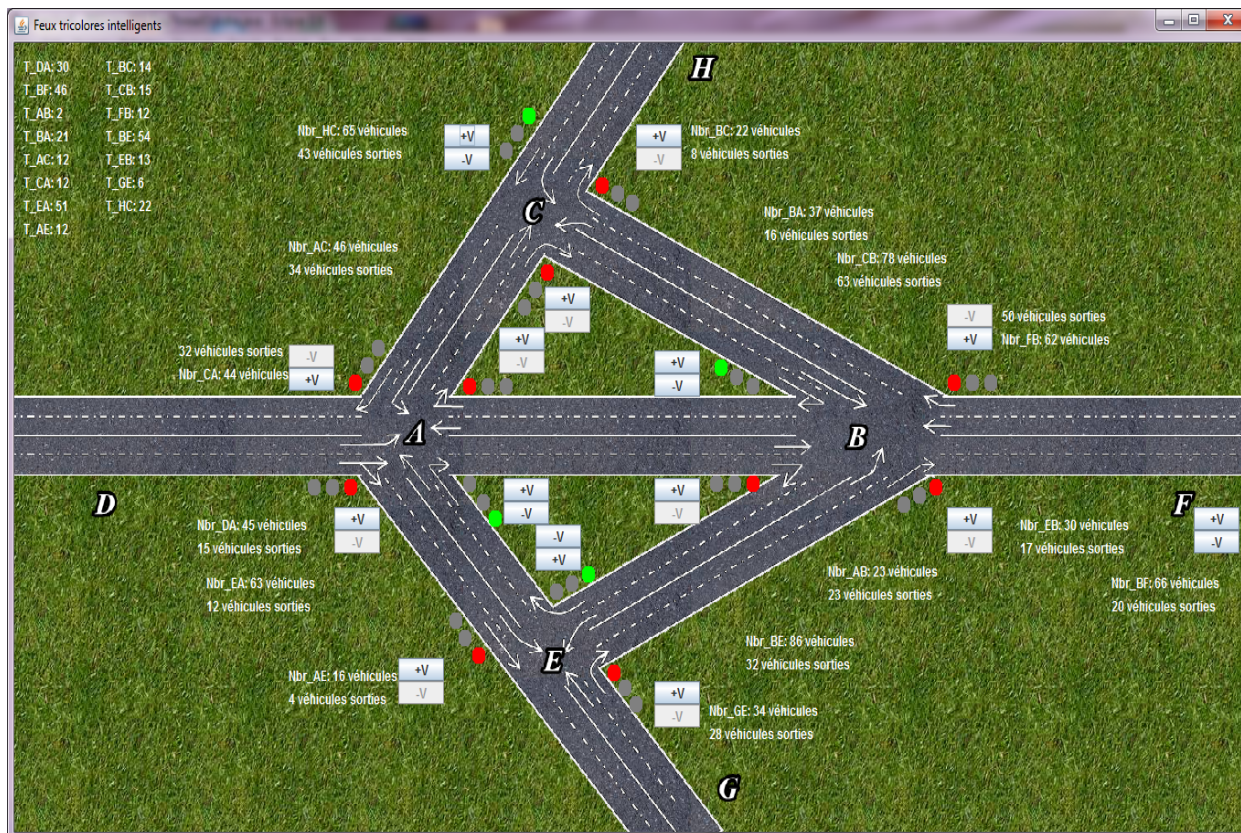


FIGURE 4.10 – Feux tricolores intelligents

4.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce dernier chapitre le langage et outils de développement que nous avons utilisé afin d'implémenter notre solution proposée. Dans le but de tester son fonctionnement et sa faisabilité avec une évaluation de différentes méthodes et des algorithmes qui compose notre solution.

Conclusion générale et perspectives

La congestion du trafic routier urbain est l'un des problèmes socio-économiques qui doivent être résolus pour supporter l'évolution de la société. La solution appropriée est de trouver des algorithmes de contrôle afin de prévenir l'apparition de la congestion routière.

L'objectif de notre étude est de nous attaquer à la problématique de la congestion dans le but de fluidifier le trafic routier, cela c'est fait grâce à une démarche s'appuyant sur la communication véhicule infrastructure , infrastructure à infrastructure et un algorithme pour trouver le meilleur chemin afin de réduire le temps de déplacement.

Au fil de ce document, nous avons tout d'abord passé en revue les principaux notions de base d'internet des objet et les villes intelligentes.

Par la suite, nous avons présenté l'état de l'art sur gestion des feux et leurs inconvénients. La partie qui suit l'étude d'état de l'art porte sur le problème de la congestion urbaine et sur l'optimisation des feux de signalisation à l'aide de système de transport intelligent.

Notre réflexion nous a amené à proposer une nouvelle solution pour la gestion dynamique des feux tricolores intelligents, cette partie porte sur l'optimisation des feux tricolores à l'aide de l'intégration de la communication véhicule-à-infrastructure , la communication infrastructure-à-infrastructure dans de multiples intersections, l'algorithme de Dijkstra est utilisée pour la gestion dynamique des feux tricolores intelligents pour chaque intersection. La dernière étape de ce travail est consacrée à l'implémentation de la solution proposée avec un langage de programmation Java.

L'approche que nous avons proposée dans ce mémoire est ensuite présentée. Nous avons introduit une nouvelle stratégie pour la gestion dynamique des feux tricolores pour les villes intelligentes. Dans un premier temps, nous avons proposé un algorithme d'optimisation par Dijkstra, pour orienter les véhicules à prendre la bonne décision dans le choix du parcours optimal et de favoriser la fluidité du trafic. Cet algorithme se base sur une fonction multi-objective avec plusieurs paramètres (*distance, vitesse, nombre de véhicule et capacité*). Le recueil de ces données joue un rôle important afin de s'assurer de l'applicabilité et de l'efficacité de notre solution. Nous avons proposé deux types de communication, véhicule à infrastructure et infrastructure à infrastructure afin d'obtenir l'état du trafic en temps réel. Enfin nous avons proposé un algorithme pour la gestion dynamique des feux tricolores intelligents en fonction de nombre de véhicules dans chaque tronçon.

Les perspectives que laissent entrevoir ce mémoire sont nombreuses. D'une part, il serait intéressant de prolonger le temps du feu vert en fonction du nombre de personnes qui ont l'intention de traverser. Plus il y en a, plus longtemps le feu reste allumé pour laisser assez de temps aux piétons. D'autre part il serait intéressant aussi de s'adapter les feux tricolores au présence des véhicules prioritaires (*par exemple : ambulance*).

Bibliographie

- [1] Roxin, I., Bouchereau A., "Ecosystème de l'Internet des Objets", dans Bouhai N. et Saleh I., (dir.) *"Internet des objets : Evaluations et Innovations"*, ISTE Editions Londres, Mai 2017.
- [2] «That "Internet of Things" Thing-RFID Journal», <http://www.rfidjournal.com/articles/views?4986>, consulté le 22/11/2019
- [3] Cluster of European Research Projects on the Internet of Things, *Vision and Challenges for Realising the Internet of Things*, March 2010, Article.
- [4] Challal Y., *"Sécurité de l'Internet des Objets : vers une approche cognitive et systémique"*, HDR, Juin 2012, UTC.
- [5] <https://blog.lesjeudis.com/10-applications-de-l-internet-des-objets-qui-revolutionnent-la-societe/> (consulté le 19/11/2019).
- [6] <https://qualite829.wordpress.com/2017/10/23/internet-des-objets-internet-of-things/> (consulté le 19/11/2019).
- [7] Dave Evans, *L'Internet des objets Comment l'évolution actuelle d'Internet transforme-t-elle le monde ?*, Avril 2011.
- [8] Imad Saleh, *Internet des Objets (IdO) : Concepts, Enjeux, Défis et Perspectives*, Récupérer de https://www.openscience.fr/IMG/pdf/iste_ido18v2n1_1.pdf (consulté le 26/11/2019).
- [9] <https://www.connectwave.fr/techno-appli-iot/marches-cles-de-liot/smart-city-et-iot/> (consulté le 19/11/2019).
- [10] <http://modellium.com/nouvelles/definition-ville-intelligente/> (consulté le 19/11/2019).

-
- [11] Villes Intelligentes, *La valeur économique et sociale de la construction d'espaces urbains intelligents*, <https://gfi.world/uploads/media/Article/0001/04/fd355df86a8f1c0a56b3962303352847ab8e7fdf.pdf> (consulté le 26/11/2019).
- [12] The smart city model. In European smart cities. <http://www.smart-cities.eu/model.html> (consulté le 26/11/2019).
- [13] Smart city wheel. In *Boyd Cohen smart cities. Urban and climate strategist Boyd Cohen*. <http://www.boydcohen.com/smartcities.html> (consulté le 26/11/2019).
- [14] Sandra Breux et Jeremy Diaz, *La ville intelligente Origine, définitions, forces et limites d'une expression polysémique*, Récupérer de <http://espace.inrs.ca/4917/1/Rapport-LaVilleIntelligente.pdf> (consulté le 26/11/2019).
- [15] Joelle Simard, *La ville intelligente comme vecteur pour le développement durable*, Récupérer de https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2015/Simard_Joelle_MEnv_2015.pdf
- [16] <http://www.wbi.be/fr/page/quatre-risques-importants-villes-intelligentes> (consulté le 26/11/2019).
- [17] <https://e-rse.net/smart-cities-classement-top-5-villes-intelligentes-durables-27143/#gs.cBgMJGun> (consulté le 26/11/2019).
- [18] <https://steknol.com/internet-des-objets-iot-pour-les-villes-intelligentes/> , consulté le 19/11/2019.
- [19] <https://www.djazairress.com/fr/letemps/47827> (consulté le 26/11/2019).
- [20] Mohamed Tlig, *Coordination locale et optimisation distribuée du trafic de véhicules autonomes dans un réseau routier*, Ecole doctorale IAEM Lorraine, 26 mars 2015.
- [21] Aidée Carrière, *La gestion en temps réel d'un feu de circulation dans le contexte des systèmes de transport intelligents* , université de Montréal, Novembre 2005, Mémoire de maîtrise ès sciences.
- [22] <https://www.scienceabc.com/innovation/ready-steady-go-the-evolution-of-traffic-lights.html> (consulté le 19/11/2019).
- [23] <https://www.idrivesafely.com/defensive-driving/trending/history-and-meaning-colored-traffic-lights> (consulté le 19/11/2019).

- [24] <https://www.theguardian.com/notesandqueries/query/0,5753,-1460,00.html> (consulté le 19/11/2019).
- [25] Instruction interministérielle sur la signalisation routière, Récupérer de http://www.equipementsdelaroute.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/IISR_6ePARTIE_vc20120402_cle573dda.pdf (consulté le 26/11/2019).
- [26] Corinne Baban, Florence Botillot, *Les Systèmes temps réel de commande de feux en milieu urbain*, Avril 2003, Synthèse.
- [27] D.I. Robertson et R.D. Bretherton. "Optimizing networks of traffic signals in real time-the SCOOT method". Dans : IEEE Transactions on Vehicular Technology 40.1, fév 1991.
- [28] Association mondiale de la route / World Road Association. *AIPCR Manuel sur les systèmes de transport intelligents (STI) (seconde édition)*. Anglaise : ISBN 2-84060-174-5 Route 2 Market Ltd. Française : ISBN 2-84060-188-5 AIPCR Secrétariat. Paris, 2003.
- [29] Vipin Kumar. "Algorithms for constraint-satisfaction problems : A survey". In : AI magazine 13.1 (1992), page 34.
- [30] C. Lee. Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller. ii. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2) :419 –435, mar/apr 1990.
- [31] Z. R. Abdy. Fuzzy logic traffic signal control.
- [32] F. Zou, B. Yang, and Y. Cao. Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network. In *9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI 2009)*, pages 1–1040, 2009.
- [33] M. Lescieux. Application à la commande floue. http://auto.polytech.univtours.fr/automatique/AUA/ressources/Introduction_logique_floue.ppt.
- [34] X.-F. Chen and Z.-K. Shi. Real-coded genetic algorithm for signal timing optimization of a single intersection. In *2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, volume 3, pages 1245 – 1248, 2002.
- [35] S. Takahashi, H. Nakamura, H. Kazama, and T. Fujikura. Genetic algorithm approach for adaptive offset optimization for the fluctuation of traffic flow. In *The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems*, pages 768 – 772, 2002.

-
- [36] W. Wei and Y. Zhang. Fl-fn based traffic signal control. *In IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, volume 1, pages 296 – 300, 2002.
- [37] J. Spall and D. Chin. Traffic-responsive signal timing for system-wide traffic control. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 5(3-4) :153–163, 1997.
- [38] E. Bingham. Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control. *European Journal of Operational Research*, 131(2) :232–241, 2001.
- [39] Sébastien Faye, *Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil*, Mars 2012, Rapport Technique.
- [40] Le siècle de la voiture intelligente, Rapport d'étude CERTU N9292, Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, 2009.
- [41] Sadmi Katia et Oukrid Akila, *Le phénomène des accidents de circulation en Algérie et les mécanismes de prévention et de contrôle : Cas de la wilaya de Bejaia*, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2016-2017, Mémoire Master.
- [42] Jia Wu, *Utilisation de la conduite coopérative pour la régulation de trafic dans une intersection*, École Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur et Microtechniques, 20 Juillet 2011.
- [43] Zidi Kamel, *Système Interactif d'Aide au Déplacement Multimodal (SIADM)*, Université des Sciences et Technologies de Lille, 13 décembre 2006, Thèse.
- [44] http://fr.wikibooks.org/wiki/Programmation_Java (consulté le 21/11/2019).
- [45] <http://www.singaomara.com/repEclipse/Eclipse.html> (consulté le 26/11/2019).