

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A/Mira de Béjaïa  
Faculté des Sciences Exactes  
Département d'Informatique



*Mémoire de fin de cycle*  
*en vue d'obtention du diplôme de master recherche en informatique*  
*Option : Réseaux et systèmes distribués*

Thème

---

Modélisation et simulation du trafic routier à l'aide des  
réseaux de capteurs sans fils.

---

Réalisé par :

M<sup>lle</sup> HADDADI Kahina & M<sup>lle</sup> KACI Kahina

Devant le jury composé de :

Présidente : M<sup>me</sup> S.BOUTRID ,Université de Béjaïa.  
Examinatrice : M<sup>me</sup> HAKMI ,Université de Béjaïa.  
Examinatrice : M<sup>me</sup> L.KHOUFACHE ,Université de Béjaïa.  
Promotrice : M<sup>me</sup> N.KHOULALENE ,Université de Béjaïa.

Juin 2013

## \* \* \* \* *Remerciements* \* \* \* \*

" El7amdulillahi alladhi tattimu bini3matihi assalli7at "

" L'imagination est plus importante que le savoir "

"God helps those who help themselves"

Les remerciements! Ça permet à chaque étudiant de remémorer les moments importants de sa vie qui ont ponctué ses années d'études, ainsi que les personnes qui l'ont accompagnées et encouragées. Ces années passées ensemble à l'université ont été l'occasion pour nous de rencontrer de nombreuses personnes qui nous ont beaucoup apportées du point de vue scientifique, mais également de partager des amitiés fortes et inoubliables.

En préambule, l'immense et l'éternel gratitude au grand Dieu tout puissant qui nous a donnée la force et la vie pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier en premier lieu Mlle KHOULLALENE Nadjet, notre promotrice pour ses encouragements, ses idées, ses conseils et sa sympathie qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à l'ensemble des membres de jury, pour nous avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer notre travail.

Un grand merci à ZIANI Sofiane qui nous a apporté une aide plus que précieuse. Nous aimerions aussi souligner la gentillesse particulièrement touchante de Melle Ouanteur Cilia, pour ses conseils qui nous ont été très utiles.

Un merci sans égal à nos deux familles pour leur soutien, leurs encouragements, leur présence à nos côtés dans les meilleurs mais aussi dans les pires moments. Pour avoir été le pilier de notre réussite, nous vous exprimons notre reconnaissance infinie.

À présent, nous souhaitons saluer tous les acteurs de notre quotidien. En effet, c'est l'occasion de remercier toutes les personnes que nous avons pu croiser durant ces années d'études et qui ont toutes, à leur manière, embelli celles-ci de près ou de loin.

Toutefois, nous espérons que personne ne se sentira offensé d'avoir été omis, tout en espérant que l'émotion d'avoir terminé ce travail pourra justifier ces oublis s'il y en a.

\* \* \* \* *Dédicaces* \* \* \* \*

Kahou

\* \* \* \* *Dédicaces* \* \* \* \*

Kahoche

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

CAN :Convertisseur Analogique Numérique

CE :Commission Européenne

E/O : est/ouest.

CSMA/CD :Carrier Sense Multiple Access/ Collision De-tect

FA : File d'Attente

FDMA :Frequency Division Multiple Access

FIFO : (First In First Out) premier arrivé premier servi.

GPS : Global Posi-tionning System

I : intersection.

CEI : Commission électrotechnique internationale

IEEE 802.11p :Institute of Electrical and Electronics Engineers 802.11 protcol

IHM : interface homme / machine.

IVC : Inter-Vehicule Communication

LLC : Logical Link Control

MAC : Media Access Control.

N/S : nord/sud.

ND : Noeud Destination

NI :Noeud Intermédiaire

NOx :doxydes dazote

NS :Noeud Source

OSI : Open Système Interconnexion.

QoS : Qualité of Service.

RCSFs :Les réseaux de capteurs sans fil.

RFA : Réseau de File d'attente.

RVC : Roadside-to-Vehicule Communication

---

SR-CSMA :Safety Range Carrier Sense Multiple Access

STI : Système de Transport Intelligent

VANet :Vehicular Ad-Hoc Network

WLAN :Wirless Local Area Network

WSN : Wireless Sensor Networks.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Table des Matières</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>v</b>
<b>Table des figures</b>	<b>iii</b>
<b>1 Généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs)</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction . . . . .	3
1.2 Définition d'un nœud capteur . . . . .	3
1.2.1 Architecture d'un nœud capteur . . . . .	4
1.2.1.1 Architecture Matérielle : . . . . .	4
1.2.1.2 Architecture logicielle . . . . .	5
1.2.2 Les types de capteurs . . . . .	5
1.3 Architecture d'un réseau de capteur sans fil(RCSF) . . . . .	8
1.4 La pile protocolaire . . . . .	9
1.5 Méthodes d'accès au canal . . . . .	11
1.6 Les caractéristiques des RCSF <sub>s</sub> . . . . .	11
1.7 Classification des RCSF <sub>s</sub> . . . . .	12
1.8 Paramètres influençant la conception d'un RCSF . . . . .	13
1.8.1 La tolérance aux pannes . . . . .	13
1.8.2 Le facteur d'échelle . . . . .	13
1.8.3 Les coûts de production . . . . .	13
1.8.4 Le support de transmission . . . . .	14
1.8.5 La topologie du réseau . . . . .	14
1.8.6 L'environnement de déploiement . . . . .	14
1.8.7 La consommation d'énergie . . . . .	14

1.9	Les domaines d’application d’un RCSF . . . . .	15
1.9.1	Applications militaires . . . . .	15
1.9.2	Applications médicales . . . . .	16
1.9.3	Applications environnementales . . . . .	16
1.9.4	Applications commerciales . . . . .	17
1.9.5	Applications sur la surveillance . . . . .	17
1.9.6	Applications sur le transport . . . . .	17
1.9.7	Applications sur la traçabilité et la localisation . . . . .	18
1.10	Les enjeux des RCSFs . . . . .	18
1.11	Conclusion . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Les systèmes de transport intelligents</b>	<b>20</b>
2.1	Introduction . . . . .	20
2.2	Les systèmes de transport intelligents(STI) . . . . .	20
2.2.1	Définition des STI . . . . .	20
2.2.2	Contexte des STI . . . . .	21
2.2.3	L’architecture des STI . . . . .	21
2.3	Quelques types des STI . . . . .	22
2.4	Fonctionnement des STI . . . . .	22
2.4.1	Fonctions des composantes des STI . . . . .	23
2.4.2	Facteur humain . . . . .	24
2.5	Planification et lancement d’un STI . . . . .	24
2.5.1	Planification des STI . . . . .	24
2.5.1.1	Cadre de planification des STI . . . . .	24
2.5.2	Lancement des STI . . . . .	25
2.6	Les avantages des STI . . . . .	25
2.6.1	Avantages particuliers . . . . .	25
2.6.1.1	Avantages en matière de sécurité . . . . .	25
2.6.1.2	Avantages en matière d’efficacité . . . . .	25
2.6.1.3	Avantages en matière de productivité et de réduction des coûts . . . . .	26
2.6.1.4	Avantages sur le plan de l’environnement . . . . .	26
2.6.1.5	Avantages pour les personnes ayant des problèmes de mobilité . . . . .	26
2.6.2	Avantages pour l’exploitation du réseau routier . . . . .	26
2.6.2.1	Avantages du contrôle du trafic . . . . .	26
2.6.2.2	Avantages de l’information des voyageurs . . . . .	26
2.6.2.3	Avantages de la synergie . . . . .	27
2.7	Domaines d’application des STI . . . . .	27

2.7.1	Surveillance et protection de l’environnement . . . . .	27
2.7.2	Sécurité et sûreté . . . . .	27
2.7.3	Gestion de congestion . . . . .	28
2.7.4	Productivité et efficacité . . . . .	28
2.7.5	Information des voyageurs . . . . .	28
2.7.6	Facteurs de confort . . . . .	28
2.8	Les STI dans les pays développés . . . . .	29
2.8.1	En Europe . . . . .	29
2.8.2	Au Canada . . . . .	29
2.8.3	Au Japon . . . . .	30
2.9	Enjeux et Défis . . . . .	30
2.9.1	Homme et machine . . . . .	30
2.9.2	Intégration et interopérabilité : . . . . .	31
2.9.3	Protection de la vie privée . . . . .	31
2.9.4	Sécurité des informations . . . . .	31
2.9.5	Adaptation du conducteur . . . . .	31
2.10	L’avenir des STI . . . . .	31
2.11	Conclusion . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Etat de l’art</b>	<b>33</b>
3.1	Introduction . . . . .	33
3.2	Définitions . . . . .	33
3.2.1	Définition d’ubiquité . . . . .	33
3.2.2	Définition de la congestion . . . . .	34
3.3	Critères pris en considération lors de l’évaluation des solutions . . . . .	34
3.3.1	Précision dans la localisation . . . . .	34
3.3.2	Sûreté et fiabilité des systèmes et des véhicules . . . . .	34
3.3.3	La scalabilité . . . . .	34
3.3.4	Mobilité et congestion . . . . .	34
3.3.5	Efficacité et productivité . . . . .	35
3.3.6	Satisfaction de la clientèle . . . . .	35
3.4	Les solutions proposées au problème de la congestion urbaine . . . . .	35
3.4.1	Les systèmes d’aide à la conduite . . . . .	35
3.4.2	Les carrefours giratoires . . . . .	36
3.4.3	Les feux de gestion d’accès . . . . .	37
3.4.4	Les réseaux véhiculaires . . . . .	37
3.4.4.1	La méthode VANet . . . . .	37

3.4.5	Contrôle de Congestion dans les Réseaux Véhiculaires, Razvan STANICA	38
3.4.6	Optimisation des feux de signalisation . . . . .	40
3.4.6.1	La méthode de Zhou et al . . . . .	40
3.4.7	La méthode de Zou et al . . . . .	41
3.4.8	Algorithme distribué pour des intersections multiples . . . . .	42
3.4.8.1	Système de priorisation des véhicules particulier à base des RCSFs . . . . .	43
3.5	Conclusion . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Régulation du trafic routier sur des intersections multiples contiguës</b>	<b>46</b>
4.1	Introduction . . . . .	46
4.2	Le trafic routier et la congestion . . . . .	47
4.2.1	Causes de l'émergence du problème de la congestion . . . . .	47
4.2.2	Définition des variables du trafic routier . . . . .	48
4.2.2.1	Variables individuelles . . . . .	48
4.2.2.2	Variables concernant deux véhicules . . . . .	48
4.2.2.3	Variables concernant le trafic routier . . . . .	49
4.3	Gestion de multiples intersections par optimisation des feux de signalisation . . . . .	50
4.3.1	Conception d'une intersection . . . . .	50
4.3.2	La gestion des feux de circulation . . . . .	51
4.3.2.1	Le contrôleur de feux . . . . .	51
4.3.2.2	Plan de signalisation . . . . .	52
4.3.3	Les types de contrôle des feux de signalisation [2,28,30] . . . . .	53
4.3.3.1	Les modes de fonctionnement des contrôleurs . . . . .	54
4.3.4	Approche proposée . . . . .	55
4.3.4.1	Architecture du réseau routier . . . . .	56
4.3.4.2	Type de capteurs utilisés . . . . .	57
4.3.4.3	Les types de communication . . . . .	58
4.3.4.4	Démarche à suivre . . . . .	59
4.3.4.5	Description des phases . . . . .	61
4.4	Conclusion . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Modélisation et simulation de l'approche</b>	<b>64</b>
5.1	Introduction . . . . .	64
5.2	Problème et modélisation . . . . .	65
5.2.1	Complexité du problème . . . . .	65
5.2.2	Modélisation de l'approche . . . . .	65

5.2.2.1	Description de l'approche dynamique . . . . .	66
5.2.2.2	Modélisation d'intersections multiples . . . . .	66
5.2.2.3	Outils de modélisation . . . . .	68
5.2.3	La théorie des files d'attente . . . . .	69
5.2.3.1	Structure de base d'un système de file d'attente (FA) . . . . .	69
5.2.3.2	La notation de Kendall . . . . .	70
5.2.3.3	La loi de Little . . . . .	71
5.2.3.4	Files d'attente markoviennes . . . . .	72
5.2.4	Les système d'attente avec priorité . . . . .	74
5.2.5	Les réseaux de file d'attente RFA . . . . .	75
5.2.5.1	Les différents types de RFA . . . . .	76
5.2.5.2	Réseaux de files d'attente à forme produit . . . . .	76
5.2.6	Présentation du modèle d'intersection à simuler . . . . .	77
5.2.7	Etude analytique . . . . .	79
5.3	Simulation . . . . .	80
5.3.1	Généralité sur la simulation . . . . .	80
5.3.2	Cycles de modélisation et de simulation . . . . .	80
5.3.3	Simulation par événement discrets . . . . .	81
5.3.4	Outil de simulation . . . . .	81
5.3.5	Simulation d'une file d'attente . . . . .	82
5.3.6	Test d'hypothèse . . . . .	82
5.3.7	Interprétation des résultats de simulation . . . . .	83
5.3.7.1	Résultats de simulation . . . . .	83
5.4	Conclusion . . . . .	84

<b>Bibliographie</b>	<b>88</b>
----------------------	-----------

<b>Annexe A</b>	<b>92</b>
-----------------	-----------

## LISTE DES TABLEAUX

3.1	Comparaison des solutions basées sur les réseaux véhiculaires. . . . .	39
3.2	Comparaison des approches basées sur la gestion des feux de signalisation. . . .	44
5.1	Processus d'arrivée des véhicules. . . . .	83
5.2	Résultat de simulation de la solution de l'an 2012 [43] . . . . .	83
5.3	Résultats de la simulation de notre modèle . . . . .	84
5.4	probabilité de routage . . . . .	93

## TABLE DES FIGURES

1.1	Nœud . . . . .	4
1.2	Les composants d'un nœud capteur. . . . .	5
1.3	Exemple d'un capteur codeur. . . . .	6
1.4	Capteur mécanique. . . . .	6
1.5	Capteur électrique. . . . .	6
1.6	Capteur pneumatique. . . . .	7
1.7	Capteur électromagnétique. . . . .	7
1.8	Capteur optique. . . . .	7
1.9	Communication dans un RCSF. . . . .	8
1.10	Architecture de communication. . . . .	11
1.11	La surveillance militaire en utilisant les RCSFs. . . . .	15
1.12	La surveillance médicale utilisant les RCSFs. . . . .	16
	environnement utilisant les RCSFs.17figure.1.13	
1.14	Le contrôle du trafic routier utilisant les RCSFs . . . . .	18
2.1	Exemples de STI. . . . .	21
2.2	panneau électronique. . . . .	22
2.3	Dispositif de surveillance. . . . .	23
2.4	Chaîne d'information d'un STI. . . . .	24
2.5	Les STI en France. . . . .	29
2.6	Installation de la technologie de pesage autoroutier dynamique dans le Nouveau-Brunswick. . . . .	30
3.1	Exemple de simulateur de conduite. . . . .	36
3.2	Exemple de réseau VANet. . . . .	38
3.3	Intersection avec deux capteurs par voie. . . . .	41

4.1	Causes de la congestion dans les routes à grande circulation . . . . .	48
4.2	Modèle général constitué de cinq intersections. . . . .	51
4.3	Exemple dun plan de feu sur une intersection . . . . .	53
4.4	Architecture du RCSF déployée sur de multiples intersections. . . . .	57
4.5	Fonctionnement du protocole CSMA/CD. . . . .	59
4.6	du nombre de phases dans le cas de congestion. . . . .	62
4.7	Illustration du nombre de phases dans le cas de non congestion. . . . .	63
5.1	Les connexions probables des véhicules. . . . .	68
5.2	Représentation de la structure de base d'une FA. . . . .	70
5.3	schéma dune file dattente simple. . . . .	71
5.4	Trois exemples de RFA (ouvert, fermé et mixte) . . . . .	76
5.5	Modélisation d'une seule intersection avec les RFA. . . . .	78
5.6	Le modèle général dun réseau de files dattentes constitué de cinq intersections. .	79
5.7	Cycle de modélisation et de simulation . . . . .	81
5.8	Arrivées Poissoniennes . . . . .	92
5.9	Oranigramme de simulation . . . . .	94

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'ère des IQUE s va couvrir une période d'une quinzaine d'années, de 1975 à 1990 environ. Toute une génération de mots recouvrant des concepts liés à l'innovation dans un domaine d'activité humaine apparaît. Citons en vrac : la robotique, la bureautique, la télématique (téléinformatique), la domotique (Automatisation des installations de l'habitat) . Et bien sûr n'omettons pas l'informatique.

Depuis quelques années, l'informatique moderne se mêle à la plupart des domaines scientifiques. Des composants électroniques de plus en plus petits communicants de manière efficace : la tendance est à la miniaturisation. Un des domaines de recherche de l'informatique moderne porte justement sur ce type de composants : les réseaux de capteurs sans fils. Ces réseaux, autonomes et spontanés, consistent un ensemble de capteurs d'une taille réduite communiquant par ondes radio. Ainsi, ce type de réseaux donne le jour à de nombreuses applications dans divers domaines (militaire, industriel, environnemental, médical et notamment dans le domaine du transport).

De nos jours, se déplacer est devenu un aspect plus qu'essentiel de la vie quotidienne. De plus, le développement de sociétés industrialisées a transformé les habitudes des personnes en matière de mobilité. D'où le surcroît graduel du nombre de véhicules dans les métropoles qui à son tour engendre le phénomène le plus marquant du trafic routier. Nous parlons bien sûr de la congestion urbaine qui alimente de nombreuses discussions d'usagers. En effet, depuis la seconde moitié du 20ème siècle, ce phénomène est devenu prédominant. La congestion urbaine a attiré une grande attention en raison de la crise énergétique mondiale et les préoccupations environnementales.

Les intersections constituent un point sensible dans la circulation routière, elles sont touchées d'une manière directe par la congestion du trafic. Il s'avère donc important de régulariser les paramètres qui gèrent le trafic au niveau des intersections afin de fluidifier les flux du réseau routier.

Afin de pouvoir réduire la congestion urbaine, nous nous sommes intéressés à un aspect visible et très répandu de la vie quotidienne, nous parlons bien évidemment de l'optimisation des feux de signalisation. Le feu de signalisation se présente donc à nous comme un outil de gestion de la circulation routière ; tous, nous savons à quoi il peut bien ressembler, à quoi il peut bien servir. Nous nous intéressons par le biais du levier de l'optimisation du cycle des feux à permettre un écoulement fluide du trafic routier, cela grâce à une synchronisation adéquate et optimale.

La modélisation dynamique du trafic routier constitue une aide certaine et cela en décrivant et représentant la réalité physique qu'est l'écoulement du trafic, elle explique cette réalité et prévoit son évolution : elle est ainsi un socle solide de conception d'outils opérationnels, d'évaluation, de prévision, d'aide à la décision et de régulation. La démarche suivie au cours de notre étude est basée sur une construction pas à pas, allant de l'observation du problème à la modélisation et la simulation de celui-ci.

Le premier chapitre de cet ouvrage est consacré à l'introduction des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs). Nous présentons entre autres leur architecture, leurs caractéristiques, les facteurs influençant leur conception. L'accent est mis sur la description des types de capteurs ainsi que leurs domaines d'application.

Le second chapitre quant à lui, se focalise sur l'étude des systèmes de transport intelligents (STI) et traite leurs différents aspects, allant de leur définition, passant par leur architecture, leurs types, leur fonctionnement, leurs avantages jusqu'à découvrir leurs enjeux, leurs défis et même leurs domaines d'application.

Le troisième chapitre synthétise les divers travaux déjà existants dans le cadre des STI. Autant dire, que nous recouvrons plusieurs domaines. Tels que, les travaux liés aux réseaux véhiculaires et particulièrement les travaux liés à la régulation de la congestion urbaine.

Le quatrième chapitre détaille le problème du trafic routier et de la congestion urbaine. Après quelques éclaircissements sur les notions relatives au sujet traité. Nous présentons une nouvelle approche qui a pour objet de régulariser le trafic routier et de diminuer la congestion grâce à l'optimisation des feux de circulation.

Le cinquième chapitre porte sur la partie modélisation. C'est à ce niveau que notre modèle sera expliqué plus en détail. Dans cette optique, nous étalerons également la partie simulation qui a pour objet de valider l'approche présentée avec les réseaux de capteur sans fil. Enfin, une conclusion générale qui résume l'apport de notre approche ainsi qu'un ensemble de perspectives et d'orientations future pour les travaux de recherche.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL (RCSFS)

### 1.1 Introduction

Les progrès de ces dernières années, en microélectronique, micromécanique et particulièrement en communication sans fil, ont permis de fabriquer des capteurs de plus en plus petits, de plus en plus performants avec des autonomies énergétiques grandissantes.

D'autre part, les techniques des réseaux mobiles permettent désormais de s'affranchir des fils et donc de déployer facilement des réseaux de capteurs, dans des endroits même difficiles d'accès.

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs) sont utilisés dans plusieurs domaines d'application à savoir : le domaine militaire, environnemental, médicale mais aussi dans le domaine de surveillance, de traçabilité et de localisation notamment lorsqu'il s'agit du contrôle du trafic routier. Dans ce chapitre, nous présenterons des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), leur architecture, leurs caractéristiques, les facteurs influençant leur conception ainsi que leurs domaines d'application.

### 1.2 Définition d'un nœud capteur

Un capteur est un petit appareil autonome capable d'effectuer diverses mesures sur son environnement immédiat comme la température, les vibrations et la pression. Il existe trois types de nœuds : nœud cible, nœud capteur et nœud puits. Un nœud capteur détecte les signaux générés par des nœuds cibles et diffuse les données nécessaires au nœud puits.



FIGURE 1.1 – Nœud capteur.

## 1.2.1 Architecture d'un nœud capteur

### 1.2.1.1 Architecture Matérielle :

Il existe de nombreux types de capteurs qui correspondent aux contraintes des réseaux (cela dépend des applications aux quelles ils sont dédiés). Cela dit, ils sont tous composés de quatre éléments de base :

- **Unité d'acquisition** : l'unité d'acquisition est composée d'un capteur ainsi que d'un convertisseur analogique-numérique (CAN). Le capteur mesure une donnée physique, le CAN transforme les signaux analogiques produits par le capteur en un signal numérique. Ce dernier est ensuite transmis à l'unité de traitement pour effectuer des analyses.
- **Unité de traitement** : cette unité est généralement constituée de deux parties. Une mémoire interne pour le stockage des données et une partie traitement composée d'un processeur couplé à un système d'exploitation. La partie traitement doit effectuer la transmission de l'information au réseau, ce qui inclut la gestion des protocoles de communication. Sur certains modèles, l'unité de traitement peut effectuer certains calculs sur les données pour optimiser les échanges, on parle alors de capteurs intelligents.
- **Unité de transmission** : l'unité de transmission envoie les informations sur le support de communication. Il peut être de type optique ou de type radio. Les communications de type radio sont sensibles aux interférences et coûtent chère en énergie. La liaison optique est très robuste mais elle ne peut être que directe car elle est sensible aux obstacles.
- **L'unité de contrôle d'énergie** : l'énergie est le facteur critique dans les réseaux de capteurs. En effet, il s'agit d'une ressource limitée et indispensable car elle est non remplaçable. Donc afin d'étendre la durée de vie du capteur et donc du réseau, les nouveaux capteurs intègrent une unité de gestion de l'énergie.

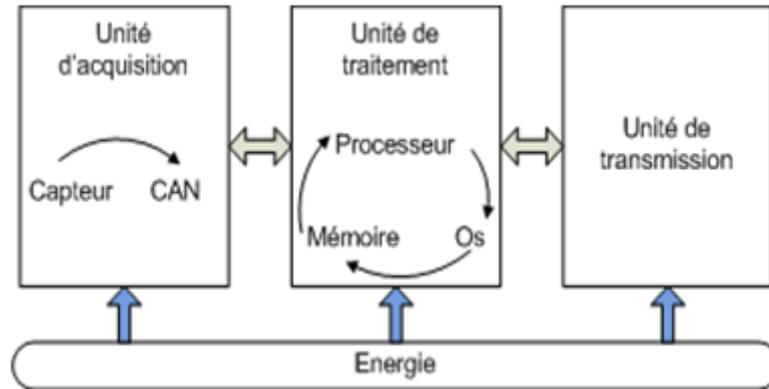


FIGURE 1.2 – Les composants d'un nœud capteur.

### 1.2.1.2 Architecture logicielle

Le système d'exploitation conçu pour les applications embarquées fonctionnant en réseaux et particulièrement pour les réseaux de capteurs sans fil est le système TinyOS décrit ci-dessous [14].

C'est un système d'exploitation Open Source dédié aux réseaux de capteurs sans fil, conçu par l'université américaine de BERKELEY. Ce dernier est régulièrement enrichi par une multitude d'utilisateurs. Sa conception a été entièrement réalisée en NesC ; langage qui se rapproche du C. Il respecte une architecture basée sur une association de composants, réduisant ainsi la taille du code nécessaire à sa mise en place. Cela s'inscrit dans le respect des contraintes de mémoires qu'observent les capteurs, pourvus de ressources très limitées dues à leur miniaturisation [15].

## 1.2.2 Les types de capteurs

On distingue essentiellement les capteurs de type codeur, mécanique, électrique, pneumatique, électromagnétique, optique et autres. Les trois derniers types sont très utilisés notamment pour la gestion du trafic routier.

- **Les codeurs** : codeurs sont des capteurs rotatifs, placés sur l'axe d'une pièce tournante, ils restituent un code numérique en fonction de la position [7].



FIGURE 1.3 – Exemple d'un capteur codeur.

- **Capteur mécanique** : les capteurs mécaniques à contact sont les seuls encore largement utilisés. L'action mécanique sur la partie mobile du capteur permet d'établir ou d'interrompre un contact électrique [7].



FIGURE 1.4 – Capteur mécanique.

- **Capteur électrique** : ces capteurs conviennent parfaitement aux applications dynamiques telles que : pour les applications de comptage et de classification des véhicules [4].



FIGURE 1.5 – Capteur électrique.

- **Capteurs pneumatiques** : d'utilisation limitée, les capteurs pneumatiques sont habituellement associés à des détecteurs électriques. Ils sont utilisés surtout pour détecter des pièces à faible distance, sans contact et donc sans usure [7].

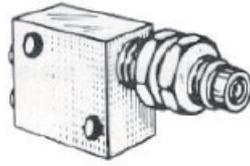


FIGURE 1.6 – Capteur pneumatique.

- **Capteur électromagnétique** : l'unité d'acquisition utilisée est un magnétomètre, permettant d'enregistrer les variations du champ magnétique terrestre et la contrainte énergétique peut facilement être levée [2].



FIGURE 1.7 – Capteur électromagnétique.

- **Capteur optique** : les capteurs du trafic à fibre optique est plus précis et plus fiable que les systèmes traditionnels de fermeture par contacts. Ces capteurs reposent sur l'émission et la réception d'un faisceau lumineux<sup>1</sup> [4].



FIGURE 1.8 – Capteur optique.

---

1. Partie de l'espace éclairée par une source de lumière se propageant en ligne droite. Les rayons lumineux permettent de représenter la direction et le sens de propagation de la lumière.

### 1.3 Architecture d'un réseau de capteur sans fil(RCSF)

Les réseaux de capteurs sans fil appartiennent à la famille des réseaux mobiles ad hoc où l'infrastructure fixe de communication et l'administration centralisée sont absentes et les nœuds jouent, à la fois, le rôle des hôtes et des routeurs. Ils se composent d'un large ensemble de capteurs à capacité et à énergie généralement limitées.

Un réseau de capteurs est un ensemble de capteurs reliés par un système de communication où le rôle de chaque capteur est de récolter un ensemble de données dans son environnement, et le transmettre de proche en proche jusqu'à atteindre généralement une station de base, qui peut jouer le rôle de coordinatrice du réseau et communiquer vers l'extérieur les données importantes recueillies.

Les capteurs déployés sont capables de surveiller, d'une manière continue, une grande variété de conditions ambiantes telles que la température, l'humidité, et de détecter également l'occurrence des événements tel que les séismes. Malgré leur capacité limitée de captage et de traitement de donnée, qui n'est qu'une conséquence de leur taille miniaturisé, les composants de communication sans fil intégrés à ces capteurs leur permettent de collaborer et de se coordonner entre eux afin d'accomplir des tâches de captage complexes.

Typiquement, un réseau de capteurs est composé d'un champ de captage constitué de plusieurs capteurs. Un utilisateur peut communiquer avec les capteurs via un nœud passerelle qui fait l'interface entre le champ de captage et la machine.

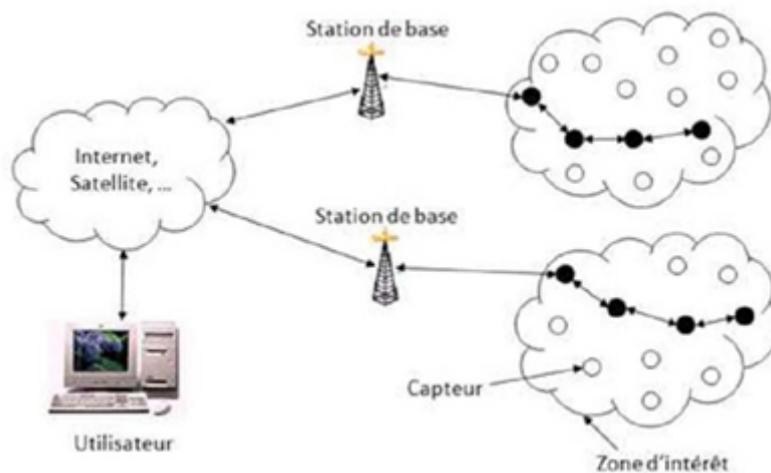


FIGURE 1.9 – Communication dans un RCSF.

## 1.4 La pile protocolaire

L'architecture de communication utilisée dans les RCSFs se compose des cinq premières couches du modèle OSI. Chaque couche a son propre rôle et ses propres protocoles pour atteindre son objectif.

- **La couche physique** : celle-ci intervient dans les techniques d'émission et de réception. Elle est responsable du choix de la fréquence, de la génération de la fréquence porteuse, de la détection du signal, de la modulation et du chiffage des données. Dans un réseau de capteurs multi-sauts, les nœuds communicants sont liés par un médium sans fil. Ces liens peuvent être constitués par les ondes radio ou des signaux infrarouges [12].
- **La couche liaison de données** : elle manipule toutes les issues de communication entre les nœuds voisins. Dans les réseaux sans fil, l'accès au médium commun doit être contrôlé. Ceci est appelé le contrôle d'accès au Médium. Cette couche comprend deux sous-couches à savoir :
  - Sous-couche LLC : (Logical Link Control) fournit une interface entre les deux couches liaison et réseau en encapsulant les segments venant de la couche réseau par l'ajout des entêtes nécessaires. Elle rassemble et fragmente les trames MAC (Media Access Control) qui incluent, entre autres, la donnée, l'information de contrôle, l'adresse source, l'adresse du destinataire et autres [1].
  - Sous-couche MAC : (Media Access Control) offre des opportunités importantes pour réduire la consommation d'énergie et prolonger la durée de vie des nœuds d'un RCSF puisqu'elle contrôle la radio. Elle permet le partage d'accès au médium et fournit un protocole pour l'échange des trames [1].
- **La couche réseau** : des protocoles spéciaux multi-sauts de routage entre les nœuds capteurs et le nœud puits sont nécessaires. Les techniques de routage ad-hoc ne se conforment pas habituellement aux contraintes des réseaux de capteurs. La couche réseau en ce qui concerne les réseaux de capteurs est habituellement conçue selon les principes suivants :
  - L'efficacité d'énergie est toujours une considération importante.
  - réseaux de capteurs sont la plupart du temps data-centrique <sup>2</sup> .
  - L'agrégation de données (le clustering <sup>3</sup> ) est une fonctionnalité majeure [12].
- **La couche transport** : la couche transport fournit un service de communication de bout en bout généralement fiable pour l'application. Elle manipule la segmentation des grands paquets. Elle effectue le contrôle des flots de données de bout en bout afin d'éviter la surcharge du récepteur ou du réseau. Dans les RCSFs, le contrôle du flot ne fonctionne

---

2. C'est un centre qui centralise des données informatique.

3. Consiste d'une façon générale à regrouper les documents d'un index par grappe, par ensemble logique.

Pour faciliter la lecture des résultats.

pas comme dans les réseaux câblés parce que les paquets retardés ne doivent en aucun cas congestionner le réseau. Aujourd'hui, la plupart des applications qui ont été suggérées pour des réseaux de capteurs essaient de maintenir des paquets très petits et de les envoyer peu abondamment [12].

- **La couche application** : selon les événements perçus, il existe différents types de logiciels qui peuvent être installés et employés dans la couche application. Nous pouvons citer comme exemples : OpenOfficeWriter comme application pour le traitement de texte utilisé généralement par les entreprises [12].

La gestion d'énergie, de mobilité et de tâches sont nécessaires. Celles-ci sont définies comme suit :

- **Plan de gestion d'énergie** : le plan de gestion d'énergie contrôle la manière d'utiliser l'énergie par le nud capteur et gère la consommation d'énergie selon le mode de fonctionnement employé (capture, calcul, et communication par radio). En effet, pour éviter de recevoir des messages redondants, le nud capteur change son mode en " Off " après une réception d'un message afin d'annoncer à ses voisins qu'il a atteint un bas niveau d'énergie [12].
- **Plan de gestion de mobilité** : le plan de gestion de mobilité détecte et enregistre le mouvement/mobilité des nuds capteurs. En utilisant ces positions, les nuds capteurs peuvent connaître qui sont leurs voisins. Parfois une auto-organisation des nuds est nécessaire à cause de la destruction de quelques nuds. Dans ce cas, la couche de gestion de mobilité doit être capable de faire changer la position des nœuds [12].
- **Plan de gestion des tâches** : le plan de gestion des tâches assure la coopération des efforts des nœuds capteurs, elle ordonnance les événements captés, et les tâches détectées dans une zone de capture spécifique. Par conséquent, les nœuds capteurs qui appartiennent à la même zone de capture ne sont pas obligés d'effectuer les tâches de capture en même temps. Selon leur niveau d'énergie, quelques nuds capteurs peuvent accomplir des tâches de capture mieux que d'autres [12].

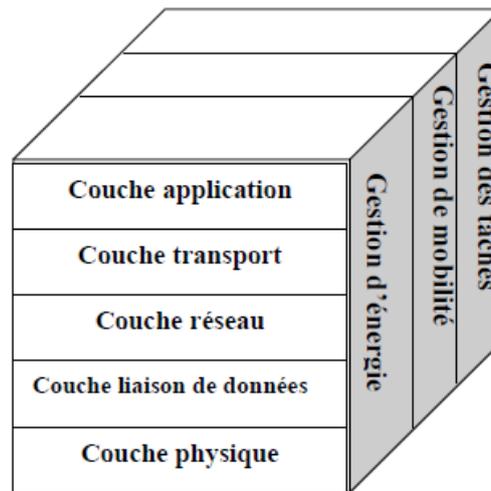


FIGURE 1.10 – Architecture de communication.

## 1.5 Méthodes d'accès au canal

Il existe diverses méthodes d'accès au canal, parmi elles nous citons les plus utilisées, à savoir :

- TDMA (Time Division Multiple Access) : accès multiple à répartition de temps, le principe de cette méthode est que la totalité de la bande de fréquences soit allouée à un seul utilisateur pendant des intervalles de temps donnés (slot). Dans ce cas, chaque utilisateur doit attendre son tour pour parler, ce qui n'est guère pratique dans le cas d'échange d'informations à temps réel.
- CDMA (Code Division Multiple Access) : accès multiple à répartition de code, dans cette méthode la totalité de la bande fréquence est allouée par tous les utilisateurs et cela de manière simultanée, chaque utilisateur utilise son propre code. Dans le cas où il existe un seul récepteur, ce dernier doit avoir recours aux codes de tous ses communicants.
- FDMA (Frequency Division Multiple Access) : accès multiple par répartition de fréquences, pour cette méthode la bande de fréquences est divisée en plusieurs sous-bandes.
- Protocole ISO/IEC 14543-3-10 : cette norme internationale (IEC ou CEI Commission électrotechnique internationale) pose les fondements d'une technologie sans fil totalement interopérable, ouverte et comparable aux normes Bluetooth et Wi-Fi. Ce protocole régit la communication radio à basse consommation d'énergie.

## 1.6 Les caractéristiques des RCSFs

Nonobstant le grand nombre de capteurs déployés lors de l'installation d'un RCSF, de fortes contraintes en termes d'énergie, de capacité mémoire, de traitement et de durée de vie subsistent

encore [13]. Parmi les caractéristiques les plus importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications, nous pouvons citer :

- **Le Type de service** : on s'attend à ce que le RCSF offre à l'utilisateur des informations significatives.
- **La Qualité de service (QoS)** : c'est une métrique qui va être offerte par un RCSF à ses utilisateurs ou applications. Le niveau de QoS est défini par un ensemble d'attributs comme le temps d'attente, la largeur de bande, et la perte de paquets qui est relié directement avec le type de service du réseau.
- **La durée de vie** : c'est la durée pendant laquelle le réseau reste opérationnel. On s'attend à ce que le RCSF puisse fonctionner au moins pendant le temps requis pour accomplir la tâche donnée.
- **La maintenance** : les changements dans l'environnement du réseau, par exemple, l'apparition de nœuds capteurs avec des batteries épuisées, exigent une solution permettant l'adaptation et le maintien des services du RCSF.
- **La programmation flexible** : c'est la capacité des nœuds capteurs à modifier les options de traitement des données acquises et à effectuer des changements et des ajustements de leurs tâches [15].

## 1.7 Classification des RCSFs

La conception d'un RCSF est orienté application. En conséquence, les architectures, les protocoles et les algorithmes des réseaux de capteurs varient cas par cas. Cependant, différents RCSFs ont des propriétés en commun. Ces réseaux peuvent être classifiés en catégories basées sur plusieurs critères, nous citons :

- Selon la distance qui sépare un nœud capteurs de la station de base, le RCSF peut être un réseau à un seul saut ou à multi-sauts. Dans un RCSF à un seul saut, tous les nœuds capteurs transmettent leurs données directement vers une station de base. Tandis que dans un RCSF à multi-sauts, les nœuds peuvent envoyer leurs données à une station de base via des nœuds intermédiaires qui exécutent une fonction de routage [1].
- Selon la mobilité des nœuds, les RCSFs peuvent être mobiles ou stationnaires. Un réseau mobile est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles évoluant dans un environnement statique. Par contre, un réseau stationnaire est constitué de nœuds capteurs fixes dédiés dans la plupart du temps à la surveillance d'occurrences d'évènements dans une zone géographique. Dans ce cas, le réseau n'effectue que la surveillance et les données capturées sont transmises en mode multi-sauts au nœud collecteur. Ce dernier est chargé, après réception de l'information, de mettre en œuvre les actions nécessaires. Il peut toujours être connecté, de manière filaire à un autre réseau [3].

- Selon la nature des stations de base, les RCSFs peuvent être avec station de base fixe ou non-fixe. Dans les réseaux avec station de base fixe, les localisations des nœuds collecteurs sont connues à l'avance par tous les nœuds du réseau. Par contre, dans les réseaux avec station de base non-fixe, les nœuds collecteurs qui peuvent être statiques ou mobiles apparaîtront momentanément pour interroger le réseau [3].
- Selon la densité des nœuds capteurs, un RCSF peut être classifié en un réseau agrégeant ou non agrégeant. Dans ce dernier, toutes les données d'un seul nœud seront envoyées à une destination. LE volume des calculs au niveau des nœuds intermédiaires est relativement petit. Cependant, la charge du trafic dans le système entier peut augmenter rapidement avec plus d'énergie consommée dans les communications [1].
- Un RCSF peut être homogène ou hétérogène. Dans la classe homogène, tous les nœuds du réseau sont identiques et partagent une même complexité matérielle. Par contre, différents nœuds sont utilisés dans la classe hétérogène. La majorité des nœuds est avec une faible complexité du matériel (accès au matériel) et d'autres avec une grande complexité [1].

## 1.8 Paramètres influençant la conception d'un RCSF

La conception d'un RCSF est influencée par plusieurs paramètres qui, une fois pris en compte, génèrent un guide de conception. Ce dernier peut être aussi utilisé pour comparer deux RCSF. Parmi ces paramètres, nous citons les suivants :

### 1.8.1 La tolérance aux pannes

les algorithmes et protocoles doivent tenir compte du fait qu'un nœud peut cesser de fonctionner par manque d'énergie ou parce qu'il a été détruit. Ils devront adapter leur niveau de tolérance aux pannes en fonction de l'hostilité du milieu dans lequel est déployé le réseau [3].

### 1.8.2 Le facteur d'échelle

le nombre de nœuds capteurs déployés peut atteindre des centaines, des milliers, voir même pour certaines applications, des millions. Les protocoles et algorithmes devront pouvoir fonctionner correctement dans tous les cas de figure [3].

### 1.8.3 Les coûts de production

si le coût d'un nœud capteur est tel que le déploiement d'un réseau revient plus cher que les capteurs traditionnels, alors le RCSF n'est pas justifié économiquement [3].

### 1.8.4 Le support de transmission

le support de transmission des nœuds doit être universel. Une possibilité est de choisir, pour les transmissions radio, les bandes de fréquences des domaines de l'industrie, les sciences et la santé, qui ne nécessitent pas de licences et sont disponibles dans tous les pays. Des contraintes de puissance et de consommation d'énergie font qu'en réalité se sont les hautes fréquences qui sont avantageuses. La transmission infrarouge aurait pu être intéressante, mais elle a été écartée parce qu'elle exige une vue directe entre l'émetteur et le récepteur [3].

### 1.8.5 La topologie du réseau

la forte probabilité de panne d'un nœud capteur ou la possibilité de rajouter des nœuds font que la topologie du réseau doit pouvoir changer dynamiquement. Il faut donc gérer avec précision la maintenance de cette topologie. Quelle que soit la méthode utilisée, le coût du déploiement doit rester le plus faible possible. Des nœuds capteurs peuvent aussi être déployés dans un deuxième temps pour remplacer ceux tombés en panne ou détruits. La topologie d'un RCSF doit s'adapter à toutes les situations, à savoir les pannes, la mobilité et le rajout des nœuds [3].

### 1.8.6 L'environnement de déploiement

les nœuds peuvent être déployés tout près de l'objet à surveiller ou en son sein. L'environnement de déploiement peut être à l'intérieur d'une grosse machine, au fond d'un océan, dans un lieu contaminé biologiquement ou chimiquement, dans un champ de bataille, dans une maison ou un immeuble, sur un animal, sur un véhicule, etc. Ces situations très variées engendrent des contraintes très fortes de l'environnement sur les nœuds capteurs [3].

### 1.8.7 La consommation d'énergie

les nœuds capteurs embarquent en général une quantité d'énergie très limitée. Les transmissions de données entre les nœuds consomment beaucoup d'énergie, surtout si des nœuds tombent en panne et qu'il faut réorganiser le RCSF. C'est pourquoi des algorithmes et des protocoles ont été développés ayant pour principal souci l'économie d'énergie, au détriment parfois de la qualité de service fournie par un RCSF [3].

## 1.9 Les domaines d'application d'un RCSF

Les réseaux de capteurs peuvent inclure différents types de capteurs selon la nature des signaux, thermique, visuel, infrarouge, acoustique ou radar, qui peuvent surveiller une grande variété de conditions ambiantes incluant la température, l'humidité, le mouvement véhiculaire, la pression, les niveaux de bruit ou autres.

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications. Parmi ces dernières, nous pouvons citer la diminution de la taille et du coût des capteurs, ainsi que l'élargissement des gammes de capteurs disponibles (mouvement, température, ...) et l'évolution des supports de communication sans fil.

En effet, le raccordement sans fil des nœuds offre un large éventail d'applications, essentiellement dans le domaine militaire, médical, environnemental, commercial, et même dans le domaine de surveillance, de transport, de traçabilité et de localisation [5].

### 1.9.1 Applications militaires

Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis) ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations). Ces utilisations militaires, comme dans le cas de beaucoup de technologies, ont été un moteur initial pour leur développement du fait de leur déploiement rapide, leur coût réduit, leur auto-organisation et leur tolérance aux pannes [6].



FIGURE 1.11 – La surveillance militaire en utilisant les RCSFs.

### 1.9.2 Applications médicales

La surveillance permanente des patients est une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure , celle-ci facilite le diagnostic des maladies grâce à des micro-capteurs qui pourront être ingérés ou implantés sous la peau.

- Les micro-caméras qui peuvent être ingérées sont capables, sans avoir recours à la chirurgie, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain.
- La création d'une rétine artificielle composée d'une centaine de micro-capteurs pour améliorer la vision de l'œil [6].

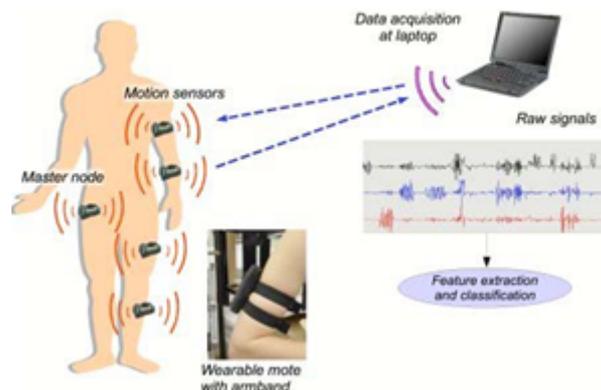


FIGURE 1.12 – La surveillance médicale utilisant les RCSFs.

### 1.9.3 Applications environnementales

Pour améliorer la connaissance de l'environnement et surtout signaler d'éventuels problèmes y afférent (incendie, pollution, épidémies, aléa météorologique...), il est possible de répartir, dans la zone considérée, des thermo-capteurs formant un RCSF et offrant ainsi la possibilité d'une surveillance et une meilleure efficacité des moyens de lutte. De la même manière, des capteurs appropriés peuvent être dispersés au-dessus d'emplacements industriels, de centrales nucléaires, puits pétroliers, afin de détecter et contrôler des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.). Ces installations permettraient d'une part, de donner l'alerte en un temps record et d'autre part de suivre l'évolution de la catastrophe pour permettre une intervention plus efficace [16].

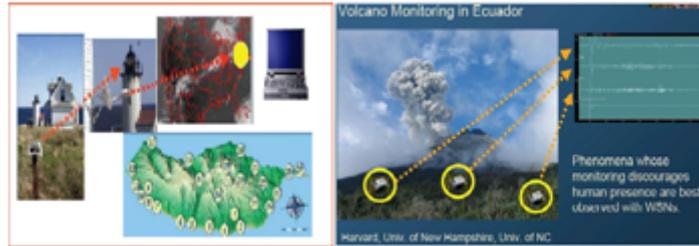


FIGURE 1.13 – Le contrôle de l'environnement utilisant les RCSFs.

### 1.9.4 Applications commerciales

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet. Grâce aux réseaux de capteurs, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts [8].

### 1.9.5 Applications sur la surveillance

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure. Le déploiement d'un réseau de capteurs de détection de mouvement peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions dans une zone de surveillance [8].

### 1.9.6 Applications sur le transport

Les nouvelles technologies apportent une assistance importante aux collectivités locales dans la mise en place d'un contrôle efficace notamment lorsqu'il s'agit de stationnement réglementé. L'information sur le stationnement des véhicules sur le réseau autoroutier fait partie des priorités inscrites dans la directive des transports intelligents. Plusieurs sites fournissent une information et permettent une réservation anticipée des aires de stationnement. De plus, des applications mobiles permettent aux automobilistes de retrouver plus facilement leur véhicule grâce à l'enregistrement de la position géo localisée par GPS(Global Positioning System), du véhicule stationné.

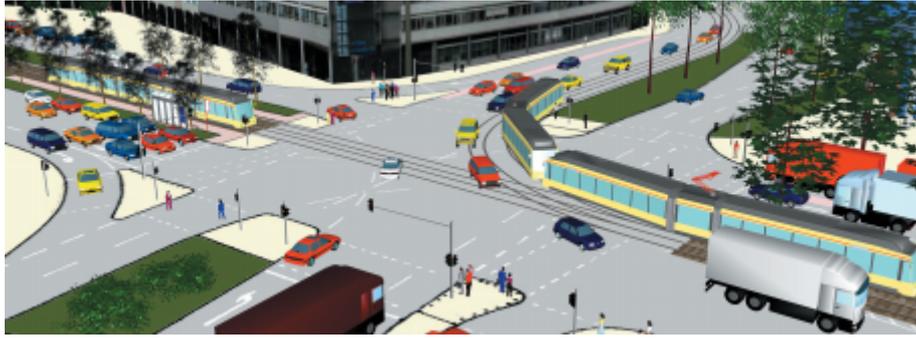


FIGURE 1.14 – Le contrôle du trafic routier utilisant les RCSFs

### 1.9.7 Applications sur la traçabilité et la localisation

Suite à une avalanche par exemple, il est nécessaire de localiser les victimes enterrées sous la neige en équipant les personnes susceptibles de se trouver dans des zones à risque par des capteurs. Ainsi, les équipes de sauvetage peuvent localiser plus facilement les victimes. Contrairement aux solutions de traçabilité et de localisation basées sur le système de GPS (Global Positioning System), les réseaux de capteurs peuvent être très utiles dans des endroits clos comme les mines[10].

## 1.10 Les enjeux des RCSFs

Les enjeux des capteurs sont divers et nombreux, parmi eux nous citons : la rapidité, la simplicité d'installation, l'économie d'énergie, etc, Ces systèmes se basent généralement sur les réseaux de collecte multi sauts tels que les réseaux radio. Ce médium impose une certaine vivacité à très courte échelle . Les mécanismes d'auto-organisation et d'auto-optimisation sont cruciaux dans ce type de réseaux.

- **La rapidité** : la technologie des capteurs ne cesse de progresser, ce qui a permis de fabriquer des capteurs de plus en plus petits et de plus en plus performants.
- **La facilité d'installation et de structuration des réseaux** : avec la technologie du sans fil, l'installation des capteurs est devenue plus flexible puisque le câblage est inutile en cas de transformations. Au prix d'un travail minimal et sans endommager les murs, les chaussées, etc, les produits basés sur cette technique s'implantent exactement là où leurs possibilités d'utilisation sont optimales. Ce qui est très intéressant pour une rénovation ou pour l'ajout de fonctionnalités à une installation électrique figée.
- **L'économie d'énergie** : les chercheurs étudient différents aspects et techniques afin de remédier au problème de l'économie d'énergie. Lors du séminaire à Lattes le 31 janvier 2013], diverses compagnies ont présenté les domaines de récupération de l'énergie ambiante. Pour celles-ci , l'idéal serait de récupérer l'énergie partout où elle se trouve (la

chaleur du corps, la chaleur ambiante, les vibrations) et à partir de toutes sources (photovoltaïques, électromagnétiques). L'atout principal de ces capteurs est donc la récupération d'énergie et la capacité de stockage.

## 1.11 Conclusion

Après avoir évoqué quelques généralités sur les RCSFs. Nous avons abordé les enjeux capitaux de ses derniers qui suscitent l'intérêt d'être étudiés. Cela nous amène à nous pencher vers une autre problématique plus critique, il s'agit des systèmes de transport intelligents.

En effet, c'est un aspect plus qu'essentiel de la vie quotidienne : qu'il s'agisse de transports en commun ou de véhicules personnels. Le vaste réseau formé de ces moyens de locomotion est immensément complexe à gérer. Sa gestion recouvre l'ensemble des techniques humaines et automatisées permettant d'assurer la surveillance de ces transports.

C'est dans le but de résoudre ce genre d'obstacles (prévention des accidents, gestion du trafic routier, réduction de congestion et autres) que sont apparus les systèmes de transport intelligents. Cela fera donc l'objet d'étude du prochain chapitre.

## CHAPITRE 2

# LES SYSTÈMES DE TRANSPORT INTELLIGENTS

### 2.1 Introduction

Les technologies de l'informatique et des réseaux sont en perpétuelle évolution. En effet, les réseaux de communication se construisent de manière spontanée et s'autorégulent, les interfaces homme-machine deviennent alors naturelles et intuitives comme dans la reconnaissance vocale ou gestuelle, les capteurs facilitent la localisation ainsi que les échanges d'information sans contact.

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.

Nous entamerons ce chapitre par la définition de quelques notions relatives aux domaines des systèmes de transport intelligents. Par la suite, nous présenterons leur architecture, leurs types, leur fonctionnement ainsi que leurs principaux avantages. Avant de conclure, nous donnerons un bref aperçu sur leurs enjeux et défis sans oublier leurs divers domaines d'application.

### 2.2 Les systèmes de transport intelligents(STI)

#### 2.2.1 Définition des STI

Apparus fin des années 90, les STI sont considérés comme étant l'application de nouvelles technologies de l'information et de la communication au domaine des transports. Ils collectent, stockent, traitent et distribuent de l'information relative à l'état d'infrastructures, à la progres-

sion de véhicules et au mouvement des personnes et des marchandises.

Autrement dit, c'est des systèmes ayant la faculté de percevoir, de raisonner et d'agir afin de fournir des services améliorant la qualité de vie des êtres vivants notamment lorsqu'il s'agit du trafic routier [2,16].



FIGURE 2.1 – Exemples de STI.

### 2.2.2 Contexte des STI

L'application des technologies de l'information et de la communication au domaine des transports peut être vue comme étant réactive car elle permet de recueillir des données propres à la circulation routière afin de la surveiller ou même tenter de la contrôler. La technologie moderne des STI a été initialement mise au point pour des applications routières, avec les systèmes éprouvés de contrôle des feux de signalisation en zone urbaine. Toutefois, les STI englobent maintenant l'éventail complet des systèmes de transport, y compris les systèmes de transport en commun, à condition que ces derniers soient à la fois plus attrayants et plus pratiques, ce à quoi les STI peuvent également contribuer [2,7].

### 2.2.3 L'architecture des STI

L'architecture des STI est élaborée à partir d'un ensemble d'exigences fonctionnelles, fondé sur les besoins et services des utilisateurs. Cette dernière permet donc d'assurer la mise en œuvre de STI adaptés aux besoins de tous les intervenants. C'est aussi la conception d'un système dont l'interaction de ses composantes soit cohérente. En effet, elle permet de définir la façon

dont les systèmes doivent interagir, clarifier les rôles des acteurs C'est pour cela, qu'elle doit reposer sur une analyse solide et rigoureuse [17,18].

## 2.3 Quelques types des STI

Les STI désignent un ensemble de technologies informatiques et de technologies de communication susceptibles d'améliorer la commodité, la sécurité et la fiabilité des services de divers systèmes.

- **Système de localisation automatique des véhicules** : le système de localisation automatique des véhicules permet de savoir où se trouvent les véhicules, ce qui améliore la fiabilité et le contrôle du service.
- **Des dispositifs en temps réel d'information pour les voyageurs** : ces dispositifs indiquent aux usagers, à l'aide de panneaux électroniques à défilement, l'heure d'arrivée exacte du prochain autobus.



FIGURE 2.2 – panneau électronique.

- **La priorité aux transports en commun** : La priorité aux transports en commun est assurée grâce à une combinaison d'équipements qui détecte les autobus et leur donne la priorité dans une situation de circulation mixte. Ce système assure le respect des horaires et de l'heure d'arrivée des autobus.
- **Les systèmes d'annonces sonores et/ou visuelles** : les systèmes d'annonces sonores et/ou visuelles renseignent les usagers sur le prochain arrêt. Ils sont d'une importance capitale pour les usagers vivant avec une incapacité, ils sont également très utiles lorsque les vitres des véhicules sont couvertes de neige ou de buée.

## 2.4 Fonctionnement des STI

Les STI fonctionnent au moyen de technologies d'information et de contrôle qui représentent le noyau technique des STI et qui permettent d'en assurer les principales fonctions, néanmoins

les facteurs humains sont également d'une importance vitale, et peuvent être très complexes [21].



FIGURE 2.3 – Dispositif de surveillance.

### 2.4.1 Fonctions des composantes des STI

Les STI sont le fruit de la révolution des technologies d'information et de la communication qui marque l'ère numérique. Ils comprennent un vaste éventail de fonctions de soutien aux utilisateurs, allant de simples alertes d'information jusqu'aux systèmes de contrôle hautement perfectionnés. Essentiellement, les services des STI peuvent être considérés comme une chaîne d'information explicitée par la figure ci-dessous [17].

- **Obtention d'information et traitement de données :** L'information sur la circulation peut être obtenue de plusieurs façons et à partir de nombreuses sources simultanément. Il faut donc, traiter les données, vérifier l'exactitude, corriger les renseignements contradictoires, organiser ces données dans des formats compatibles, et les combiner aux données provenant d'autres organismes.
- **Utilisation de l'information :** Au niveau infrastructurel ça représente la détection des incidents, la gestion de la demande et la surveillance de la congestion, mais au niveau des véhicules c'est des systèmes évolués d'aide au conducteurs.
- **La communication :** Regroupe les solutions de télécommunications qui permettent de collecter l'information, de la transmettre et de la diffuser à distance .Au niveau infrastructurel elle se fait soit au moyen des liens micro-ondes fixes ou des réseaux à fibre optique. Mais au niveau des véhicules elle s'effectue grâce à des récepteurs tels que ceux des téléphones cellulaires.
- **Diffusion de l'information :** Les ressources d'information peuvent être des panneaux à messages dynamiques ou bien des combinés et assistants numériques personnels.

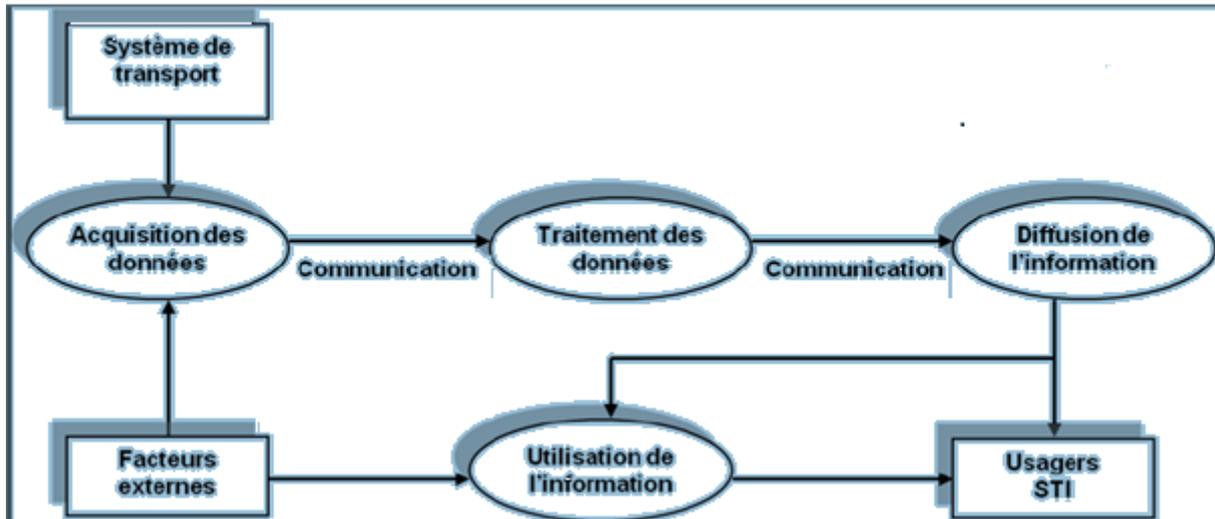


FIGURE 2.4 – Chaîne d'information d'un STI.

### 2.4.2 Facteur humain

Pour que les STI fonctionnent correctement, l'aspect humain doit être pris en compte, en attachant plus d'importance à l'interface entre l'homme et la machine (IHM). Les êtres humains font partie des STI, non seulement en tant que conducteurs, mais aussi en tant que planificateurs, voyageurs et autres, en utilisant divers modes de transport.

## 2.5 Planification et lancement d'un STI

Les STI sont indispensables pour la gestion du trafic et la sécurité des usagers. Leur comportement dépend de plusieurs phénomènes continus et leur conception nécessite la collaboration de nombreuses équipes [27].

### 2.5.1 Planification des STI

Le processus de planification d'un STI, à partir de la définition du projet jusqu'à son déploiement et son exploitation, en passant par son évaluation, son élaboration détaillée et son implantation, est un processus continu [17].

#### 2.5.1.1 Cadre de planification des STI

La mise en place d'un cadre stratégique donne l'occasion d'analyser les exigences de déploiement d'un STI, d'assigner les rôles, les responsabilités et de définir les budgets et les priorités. Ce cadre devrait définir ce qui doit être accompli pour satisfaire les objectifs de transport et les autres exigences applicables [17].

## 2.5.2 Lancement des STI

Partout dans le monde, les spécialistes des transports sont les principaux responsables de la mise en œuvre des STI. Dans ce cas, l'attention doit se porter sur la planification du projet. Cet aspect devrait inclure la prise en considération des engagements financiers, des technologies habilitantes<sup>1</sup>, des mesures initiales et des précautions requises[17].

## 2.6 Les avantages des STI

### 2.6.1 Avantages particuliers

Ces derniers sont variés et permettent d'augmenter la rapidité et la fiabilité des services. Dans ce qui suit, un certain nombre d'avantages génériques sont présentés [17].

#### 2.6.1.1 Avantages en matière de sécurité

Deux mesures communes visant à améliorer la sécurité, la réduction des collisions et la réduction du délai d'intervention. Le STI qui réduit la vitesse des véhicules est également susceptible d'atténuer les conséquences des accidents. La mesure de la réduction des délais d'intervention n'est pas un indicateur direct de la sécurité, mais il est possible de la mesurer au moyen d'un essai de fonctionnement. Les avantages que les STI offrent en matière de sécurité vont au-delà des accidents quantifiables. Il a été démontré que les systèmes d'avertissement de danger installés sur les autoroutes améliorent les perceptions des conducteurs ainsi que la qualité des déplacements.

#### 2.6.1.2 Avantages en matière d'efficacité

L'amélioration de l'efficacité constitue un des objectifs importants de tous les programmes des STI partout dans le monde. Les STI peuvent favoriser des gains en matière de temps, de déplacement et de certitude. L'information fournie aux voyageurs avant les déplacements peut être avantageuse pour l'établissement du budget des voyages et la réalisation d'économies en temps de déplacement. Ceci enchaîne avec un des principaux arguments de vente des STI, à savoir : la confiance, l'amélioration de la certitude des déplacements et autres.

---

1. Le terme " technologies habilitantes " désigne les programmes et les plates-formes qui servent à la construction des sites web.

### **2.6.1.3 Avantages en matière de productivité et de réduction des coûts**

Les STI offrent d'importants avantages sur le plan de l'offre en matière de gestion des autoroutes. La gestion des voies constitue l'une des réussites exceptionnelles des STI. Elle comprend les voies réservées aux véhicules multi-occupants, les voies à sens réversible, les limites de vitesse variables et les systèmes de contrôle de sanction.

### **2.6.1.4 Avantages sur le plan de l'environnement**

Le transport est une source importante d'émissions de gaz à effet de serre, et les STI peuvent aider à les réduire en assurant la fluidité de la circulation. Il est aussi possible de gérer et de surveiller les zones environnementales par le biais des STI. Certes, ils peuvent être utilisés pour signaler les zones infectées ou même pour surveiller la qualité de l'air.

### **2.6.1.5 Avantages pour les personnes ayant des problèmes de mobilité**

Les STI peuvent offrir des avantages considérables aux personnes ayant des problèmes de mobilité, cela, en améliorant l'accès au transport en commun, en rendant la conduite plus facile et plus sécuritaire, faciliter les déplacements en simplifiant les systèmes de paiement et de transmettre des instructions vocales afin d'aider les voyageurs à s'orienter.

## **2.6.2 Avantages pour l'exploitation du réseau routier**

Du point de vue des exploitants routiers, de nombreux produits et services de STI améliorent l'efficacité, en optimisant l'utilisation des installations et des emprises existantes. Grâce à ces améliorations, il est possible de satisfaire les exigences en matière de mobilité, de commerce et de réduire la nécessité d'agrandir les installations existantes ou d'en construire de nouvelles.

### **2.6.2.1 Avantages du contrôle du trafic**

Le contrôle du trafic est un rôle important dans l'exploitation du réseau. Les systèmes avancés font appel à des technologies de communication avancées et à des logiciels en temps réel, en vue d'accroître la sécurité et d'améliorer le débit de la circulation. Parmi les solutions, nous mentionnons la régulation des bretelles d'accès, le contrôle de la vitesse, le contrôle adaptatif des feux de circulation et le guidage routier collectif et individuel.

### **2.6.2.2 Avantages de l'information des voyageurs**

Les services d'information des voyageurs complètent les fonctions de régulation du trafic et de l'exploitation du réseau. Ils ont pour objet de fournir des renseignements détaillés, en temps réel, de haute qualité, sur les conditions d'exploitation du réseau de transport, y compris les

conditions météorologiques, afin que les voyageurs individuels puissent décider de façon éclairée s'ils doivent effectuer un déplacement, du moment où il conviendrait de l'effectuer, du mode de transport à utiliser et du parcours à emprunter.

### **2.6.2.3 Avantages de la synergie**

Un des vrais avantages à long terme des STI tient au fait qu'un système peut en soutenir un autre. Une fois que les camions, les autobus et les fourgonnettes sont dotés de dispositifs de localisation automatique, il est possible de les utiliser à titre de sources mobiles de données sur les temps de déplacement, la congestion et sur les conditions météorologiques localisées en temps réel.

## **2.7 Domaines d'application des STI**

Les STI apparaissent comme une réponse possible à un certain nombre de défis spécifiques au domaine de la mobilité. Plus généralement, les STI pourraient contribuer à l'amélioration des performances des transports au regard des critères du développement durable, que ce soit sur le plan environnemental, sécuritaire, gestion de la congestion, productivité et efficacité, voire même dans le cadre de l'information des voyageurs et de leurs confort[16,17].

### **2.7.1 Surveillance et protection de l'environnement**

À l'échelle mondiale, l'utilisation de véhicules motorisés ne semble toujours pas diminuer et la circulation routière continue de s'accroître. Par conséquent, l'impact des émissions et du bruit sur l'environnement a continué de s'aggraver. Il est clair qu'il est urgent que le secteur du transport prenne des mesures pour améliorer l'environnement, en particulier pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et mieux gérer la circulation urbaine et interurbaine.

### **2.7.2 Sécurité et sûreté**

Les services de STI peuvent rendre le transport plus sûr et plus sécuritaire. Ils peuvent maximiser sa capacité à contrôler et à réduire les impacts des désastres, tant naturels que d'origine humaine. Grâce à une planification bien pensée, à la réduction des délais d'intervention des services d'urgence, et à la création d'itinéraires d'évacuation en cas de désastre et à l'établissement de la priorité d'accès à ceux-ci. Ils peuvent favoriser une réduction durable du nombre d'accidents et de la gravité de ceux-ci en signalant les conditions et les situations dangereuses aux voyageurs.

### **2.7.3 Gestion de congestion**

La congestion constitue un problème majeur pour tous les réseaux de transport, et augmenter l'efficacité des systèmes de transport existants est un des principaux objectifs des programmes de STI partout dans le monde. Il est possible de réduire la congestion en dotant les réseaux d'instruments qui permettront d'améliorer leur exploitation en temps réel comme les capteurs qui permettront alors de contrôler ces systèmes.

### **2.7.4 Productivité et efficacité**

Les STI peuvent accroître l'efficacité des opérations de transport. Les systèmes qui gèrent les parcs de véhicules peuvent réduire les coûts administratifs, l'exploitation et l'amélioration considérable de la productivité, en permettant de calculer de façon fiable les temps de déplacement et d'effectuer la livraison juste à temps. L'utilisation des technologies de localisation et de communication permet d'affecter le plus efficacement possible les conducteurs et les véhicules.

### **2.7.5 Information des voyageurs**

Dans le domaine de l'information des voyageurs, un service peut être qualifié d'ambiant, s'il renseigne le voyageur en fonction de son environnement direct. Il s'agit donc de services capables d'adapter l'information en fonction des spécificités de l'utilisateur, de sa localisation et selon ses besoins afin de l'aider à réaliser son voyage dans les meilleures conditions possibles.

### **2.7.6 Facteurs de confort**

Les usagers de tout système de transport doivent se sentir à l'aise, confortable et en confiance. Le contrôle des vitesses, la régulation des accès, les alertes préalables d'incidents et les instructions sur les itinéraires de substitution peuvent faciliter les déplacements routiers et les rendre moins stressants. Les installations comme les systèmes multimédias qui fournissent à la fois des services de divertissement et de navigation peuvent en faire autant. Les usagers des transports en commun s'attendent aussi à des standards élevés de confort, de commodité et de services.

## 2.8 Les STI dans les pays développés

Il faut tout d'abord souligner que les maitres d'ouvrage en matière des systèmes de transport intelligents sont nombreux et de natures différentes [26].

### 2.8.1 En Europe

En Europe, de véritables systèmes et services STI fonctionnent et utilisent les technologies de télécommunications, de l'électronique et de l'information. Néanmoins, le développement et le déploiement à grande échelle de ces applications représentent une véritable révolution dans le domaine des transports, notamment, dans les réseaux routiers et ferroviaires, les ports maritimes, les aéroports et voies fluviales de grande qualité [20].



FIGURE 2.5 – Les STI en France.

### 2.8.2 Au Canada

Au Canada, l'innovation dans le secteur du transport est essentielle non seulement pour maintenir la croissance et la compétitivité propres du secteur, mais aussi pour contribuer à la réalisation des priorités nationales comme l'amélioration de la qualité de vie dans les villes. En effet, les STI occupent un champ d'application très vaste, ils se placent au cœur des préoccupations actuelles. Le Canada propose le projet du Nouveau-Brunswick comme chef de file et champion des systèmes de transport intelligents [22,23]. Ce dernier est devenu chef de la file au Canada atlantique dans la promotion et l'utilisation des STI. Sa Stratégie dans ce domaine pour 2008-2018 s'inspire des initiatives prises dans les provinces de l'Atlantique. Il

axera ses efforts au cours des prochaines années, sur la recherche et le développement des STI ainsi que sur le déploiement de ces derniers [23,24].



FIGURE 2.6 – Installation de la technologie de pesage autoroutier dynamique dans le Nouveau-Brunswick.

### 2.8.3 Au Japon

Au Japon, les premiers STI développés furent les systèmes de navigation routière, apparus au début des années 1980. Ces derniers, se sont ensuite rapidement développés, et au cours de ces dernières années, un grand pourcentage des voitures neuves dans ce pays sont équipées de STI améliorant ainsi leur utilisation [21].

## 2.9 Enjeux et Défis

Les formidables évolutions des STI posent de multiples défis : humains, technologiques, scientifiques, commerciaux et économiques. Sans omettre ceux, probablement plus difficiles, d'ordre social, institutionnel et politique[21].

### 2.9.1 Homme et machine

La majorité des STI embarqués qui procurent un avantage en sécurité peuvent également introduire un élément de risque. L'importance de la sécurité des interfaces homme-machine des systèmes embarqués d'information et de communication a été soulignée à maintes reprises dans les résolutions, opinions et conclusions de différentes institutions européennes.

### 2.9.2 Intégration et interopérabilité :

Un enjeu majeur qui engage fortement l'avenir des STI est celui de l'intégration de différents systèmes monofonctionnels. Ce qui oblige ces systèmes à passer par une plateforme ouverte et commune, partagée par de nombreux partenaires, publics et privés.

### 2.9.3 Protection de la vie privée

Le développement des STI doit se réaliser dans le respect des libertés individuelles et sans déresponsabiliser le conducteur. Mais la protection de la vie privée risque d'être mise à mal, par exemple par la localisation précise des véhicules.

### 2.9.4 Sécurité des informations

Au moment que l'information constitue la base de la majorité des STI, il faudra donc garantir une extrême fiabilité des serveurs d'informations, qui devront résister aux pannes, virus et autres piratages informatiques.

### 2.9.5 Adaptation du conducteur

De nombreuses fonctions des STI sont conçues pour faciliter et sécuriser la tâche de conduite, mais les interrogations demeurent sur l'acceptabilité des STI par les conducteurs et sur les modifications des comportements qu'ils risquent d'engendrer.

## 2.10 L'avenir des STI

Sauver des vies dans le domaine du transport n'est pas une option, il s'agit maintenant d'un impératif social et politique et cela n'est guère étonnant, puisque des millions de personnes perdent la vie chaque année sur les routes. La concrétisation de la vision future des STI exige un engagement de la part de nombreux intervenants à l'égard d'initiatives visant à préparer le terrain et à ouvrir la voie à de grands progrès[17].

- **Défis non techniques** : les exigences de l'environnement concernant le transport entraînent des changements dans la culture des fournisseurs et des utilisateurs des services. Ces changements laissent entendre que la culture change actuellement profondément, passant d'un environnement dominé par l'ingénierie vers la dotation multidisciplinaire.
- **Rôles, relations et financement du secteur public** : les organismes du secteur privé reconnaissent à la fois la possibilité économique offerte par un marché solide et la possibilité sociale d'améliorer le bien-être des citoyens. Toutefois, pour qu'il soit possible de concrétiser ces possibilités dans le secteur du transport, il faut améliorer la collaboration

entre les secteurs public et privé. Les relations traditionnelles entre les entreprises et le gouvernement doivent donc être redéfinies.

- **Facteurs humains** : les facteurs humains ne concernent pas seulement les mesures visant à éviter la surcharge d'information, ils consistent également à fournir l'information d'une manière plus efficace, dans les meilleurs délais et à concevoir des moyens de contrôle et d'affichage des véhicules dans des centres de contrôle qui doivent être intuitifs, cohérents, et faciles à utiliser.

## 2.11 Conclusion

Le domaine des systèmes de transport intelligents est vaste, riche et décisif que ce soit dans la vie quotidienne ou encore dans le contrôle du trafic routier.

C'est en effet, ce que nous nous sommes proposé d'étudier dans ce chapitre. Ce qui nous amène à la conclusion suivante : les STI qui actuellement facilitent, sécurisent et rendent la vie plus confortable et attrayante, n'ont pas cessé de nous étonner car ils sont en perpétuels développements et nous réserve encore plus de fascinations.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons un état de l'art sur les travaux effectués dans le cadre des STI dans le but de gérer la congestion urbaine.

# CHAPITRE 3

## ETAT DE L'ART

### 3.1 Introduction

Jamais l'homme ne s'est autant déplacé qu'aujourd'hui ; jamais il n'a autant éprouvé le besoin de transporter des biens et des services. Cette appétence répond à un besoin naturel ancien et à un droit fondamental. Dans le but de remédier à cet obstacle ardu, de spectaculaires innovations technologiques font déjà partie de notre quotidien et modifient en profondeur notre mode de vie.

Grâce aux " systèmes de transport intelligents " (STI), l'univers du transport combine technologie et infrastructure, ce qui engendre alors un transport global et multimodal visant à optimiser toutes les ressources disponibles. Les STI sont l'une des réponses technique et économique au défi des transports du XXIe siècle. Elle permet à une population de plus en plus nombreuse de se déplacer de plus en plus souvent, sans risque d'accident, avec des ressources en énergie limitées tout en réduisant les nuisances environnementales.

Dans ce chapitre, nous arborerons quelques définitions en rapport avec la problématique traitée. Avant de conclure, nous présenterons une synthèse de quelques travaux déjà existants dans ce contexte.

### 3.2 Définitions

#### 3.2.1 Définition d'ubiquité

Le concept d'informatique ubiquitaire signifie l'introduction de l'informatique : partout et à tout moment. L'informatique ubiquitaire vise à rendre les technologies adaptables, embarqués et invisibles et cela grâce à l'émergence des technologies de la communication et la miniaturisation

des dispositifs [28].

### 3.2.2 Définition de la congestion

La congestion prend place dans les réseaux de transport lorsque la demande dépasse la capacité, soit parce que la demande est trop forte, soit parce que la capacité est très faible ou pour les deux raisons. Il est possible de réduire ce conflit en dotant les réseaux d'instruments qui permettront d'améliorer leur exploitation en temps réel tel que les capteurs [33].

## 3.3 Critères pris en considération lors de l'évaluation des solutions

### 3.3.1 Précision dans la localisation

Les différentes applications portant soit sur la gestion du trafic routier soit sur les réseaux véhiculaires ont besoin d'un minimum de précision [7].

### 3.3.2 Sûreté et fiabilité des systèmes et des véhicules

La sûreté dans les transports revêt deux définitions. D'une part, elle recouvre la protection des personnes et des biens contre des actes délictueux (atteinte à l'intégrité physique des personnes, vols, vandalisme). D'autre part, elle se rapporte à la fiabilité du fonctionnement des véhicules et des systèmes, cette dernière notion impliquant le développement de la maintenance prédictive et préventive afin de minimiser la maintenance curative[28].

### 3.3.3 La scalabilité

Les différents services offerts par les applications des systèmes de transport intelligents sont souvent consulté par un nombre important d'utilisateurs ce qui surcharge le système. Différentes approches telles que les méthodes de la sécurité routière prennent en compte ce critère et mettent en œuvre des options réglant cet obstacle [29].

### 3.3.4 Mobilité et congestion

Les termes mobilité et congestion sont souvent utilisés pour décrire deux pôles d'une même réalité. La mobilité renvoie à la capacité de se rendre à destination, tandis que la congestion renvoie à l'incapacité de le faire [28].

### 3.3.5 Efficacité et productivité

L'efficacité et la productivité sont deux notions bien différentes, mais toutes deux sont relatives à la façon dont les ressources disponibles sont utilisées. Les mesures d'efficacité examinent les changements dans les débits des véhicules, ou le taux d'utilisation de la capacité existante. Quant à la productivité, elle est le plus souvent associée aux économies de coûts réalisées par le secteur public et/ou privé [29].

### 3.3.6 Satisfaction de la clientèle

La satisfaction de la clientèle est rarement utilisée en tant que mesure du succès en transport, car elle est difficile à quantifier. Cette notion de satisfaction n'a pas traité autant à l'amélioration de la mobilité qu'à des mesures plus subjectives. Les sondages et les entretiens sont les moyens les plus couramment utilisés pour déterminer la satisfaction de la clientèle [7].

## 3.4 Les solutions proposées au problème de la congestion urbaine

Dans cette partie, nous étudions les divers travaux qu'ont abordés différents auteurs. Autant dire, que nous recouvrons plusieurs domaines. Afin d'améliorer l'efficacité des routes, le débit du trafic et le temps de parcours, plusieurs solutions ont été analysées, testées et implantées. Plusieurs autres solutions sont encore à l'étape de la recherche et de la conception. Nous citons :

### 3.4.1 Les systèmes d'aide à la conduite

Le premier type de solution tourne autour des systèmes d'aide à la conduite. Il se trouve que, les régulateurs de vitesse, en plus d'augmenter le confort des conducteurs, ont aussi pour but de régulariser le flux du trafic en maintenant les véhicules à une vitesse constante. Dans la même optique, les régulateurs de vitesse adaptatifs permettent d'augmenter considérablement le débit du trafic en réduisant l'écart entre chaque voiture tout en gardant le système dans un état sécurisé. Nous pouvons citer un exemple de ce genre de systèmes ; les systèmes de transport intelligents ubiquitaires [48].

Utiliser les systèmes ubiquitaires dans les STI est une chose plus que naturelle. En effet, tout comme les STI, les systèmes ubiquitaires font désormais partie de notre vie quotidienne.

L'objectif principal de cette méthode [48] réside dans la confiance de l'utilisateur envers les systèmes de transport intelligents ubiquitaires. Les auteurs de cette solution [48] ont étudié deux simulateurs de conduite. En fait, les STI ubiquitaires sont des systèmes de conduite soutenue. Il s'agit donc, d'avoir un Co-conducteur ubiquitaires. Plus important encore, cette solution [48]

se base sur la perspicacité de convaincre les utilisateurs de faire confiance à ce genre de système afin de régulariser le trafic routier. La confiance est donc, l'un des facteurs les plus importants qui doivent être pris en compte lors de l'évaluation et de la conception de nouveaux systèmes de transport intelligents omniprésents.

#### Avantages

- De tels systèmes sont pratiques et permettent de se déplacer commodément.
- Ce genre de système permet de gagner du temps, donc de réduire le temps du trajet.

#### Inconvénients

- La confiance peut être exagérée.
- Possibilité de générer des messages erronés.
- Absence de gestion des défaillances.



FIGURE 3.1 – Exemple de simulateur de conduite.

### 3.4.2 Les carrefours giratoires

Un carrefour giratoire est un aménagement comprenant une, deux ou trois voies de circulation entourant un îlot central. La circulation dans ces voies se fait dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. De plus, les usagers qui veulent s'engager dans un carrefour doivent céder le passage aux piétons et aux véhicules qui y circulent déjà. Depuis plusieurs années, il connaît beaucoup de succès dans des pays tels l'Angleterre, la France, la Suisse, le Danemark, la Norvège et l'Australie, étant donné qu'il s'agit d'un concept dont les avantages sont la réduction de la vitesse, la diminution du nombre et de la gravité des accidents, ainsi que la gestion efficace de la circulation. Certains auteurs proposent d'analyser trois approches afin de fluidifier le trafic dans les carrefours : avec des signaux de ralentissement à l'arrivée, avec des feux de circulation à l'arrivée et avec des feux de circulation à la fois à l'arrivée mais également à l'intérieur du carrefour [28].

### 3.4.3 Les feux de gestion d'accès

Les feux de gestion d'accès, plus connus sous le nom de "rampmeter" en anglais, ont pour but d'améliorer la sécurité et la fluidité des routes en contrôlant le nombre de véhicules qui y entre. Ces feux sont installés sur les bretelles d'accès et limitent le nombre de véhicules pouvant accéder à une route donnée dépendamment du trafic déjà présent. Cela permet de garder un débit et une vitesse moyenne plus élevée en diminuant la demande d'autant plus que les résultats des simulations faites sur ses systèmes sont concluants[28].

### 3.4.4 Les réseaux véhiculaires

Depuis les premiers travaux sur les réseaux véhiculaires durant les années 80, les applications liées à la sécurité routière ont majoritairement fondé et justifié l'intérêt que l'on pouvait avoir pour ces réseaux. Nous présentons ci-dessous deux approches qui se sont penchées sur l'étude des réseaux véhiculaires dans le but de régulariser le trafic routier.

#### 3.4.4.1 La méthode VANet

Vehicular Ad-Hoc Network ou VANet, est une forme de réseau mobile Ad-Hoc, pour fournir des communications au sein d'un groupe de véhicules à portée les uns des autres par l'intermédiaire de la communication inter-véhicule (Inter-Vehicle Communication - IVC) et entre les véhicules et les équipements fixes à portée grâce à la communication d'équipement-à-Véhicule (Roadside-to-Vehicle Communication - RVC), usuellement appelés équipements de la route.

Le problème avec le déploiement dynamique et la planification d'itinéraires sur VANet [49] est que le canal sans fil partagé entre les véhicules peut facilement être saturé en raison de la transmission des données du trafic. La charge imposée par les données du trafic peut cependant être contrôlée en ajustant trois paramètres vitaux, à savoir : la taille du message à diffuser, l'intervalle de diffusion et bien sûr la puissance de diffusion. Dans le cas où la densité spatiale des véhicules est supposée à peu près constante, la quantité des données du trafic augmente de façon quadratique sur le rayon de couverture. La taille croissante des données à diffuser par chaque véhicule limite l'évolution du système. Cela dit, les auteurs de cette méthode [48] ont proposés une solution pour remédier à cette complication et ce grâce à l'agrégation des données du trafic (assemblage des données) ainsi qu'en augmentant la distance de couverture (pour gérer le trafic dans une plus grande zone).

Le but principal de cette approche [48] est que les réseaux véhiculaires contribuent à

la réalisation de routes plus sûres et plus efficaces à l'avenir en fournissant des informations opportunes aux conducteurs et aux autorités intéressées afin de fluidifier le trafic urbain et réduire ainsi la congestion.

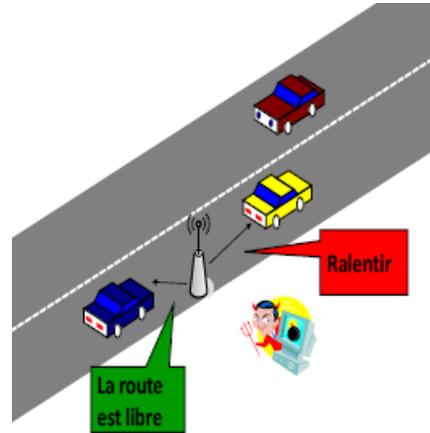


FIGURE 3.2 – Exemple de réseau VANet.

#### Avantages

- En général, bonne gestion de la route.
- Scalabilité.
- Adaptée aux hautes mobilités.

#### Inconvénients

- Pas toujours sûr, cas d'un véhicule esseulé.
- Nécessité de connaître la position des véhicules.
- Les véhicules sont limités dans leur gamme de mouvement (ils peuvent emprunter des routes pavées).

### 3.4.5 Contrôle de Congestion dans les Réseaux Véhiculaires, Razvan STANICA

Dans cette approche [50], l'auteur analyse la possibilité d'utiliser des communications sans fil inter-véhiculaires pour améliorer la sécurité routière. Les performances du nouveau réseau ainsi créé (réseau ad-hoc véhiculaire) sont étudiées analytiquement et par des simulations dans un environnement réaliste. Le travail se concentre surtout sur des scénarios avec une forte densité de véhicules. Dans ce cas, l'accès au support et la mise en concurrence entre les différents services devient un problème essentiel, en particulier pour les applications de sécurité routière qui nécessitent une qualité de service élevée pour fonctionner dans un tel contexte. L'auteur s'intéresse en particulier aux capacités de passage à l'échelle du protocole IEEE 802.11p

et montre que l'ancienne version de ce standard, proposée comme méthode d'accès dans les réseaux véhiculaires, ne peut pas résoudre ce problème de passage à l'échelle pour supporter correctement les applications de sécurité routière et pouvoir ainsi gérer la congestion. De nombreuses améliorations possibles sont analysées, liées à l'utilisation optimale de certains paramètres du protocole comme la taille de la fenêtre de contention ou bien le seuil de détection de la porteuse. De nouveaux mécanismes adaptatifs visant ces paramètres sont proposés et les améliorations ainsi obtenues sont non-négligeables. Finalement, une nouvelle méthode d'accès SR-CSMA (Safety Range Carrier Sense Multiple Access) est définie. Elle propose de contrôler différents événements tels que les collisions en les forçons entre des nuds éloignés et la congestion par le mécanisme de back-off ; tout en tenant compte des caractéristiques des applications de sécurité routière. Toujours basée sur des techniques CSMA, cette technique donne des résultats largement supérieurs à la version standard qui la précède.

#### Avantages

- Les améliorations apportées tiennent compte des caractéristiques de sécurité.
- Performances élevées de communication et de passage à l'échelle du protocole IEEE802.11.

#### Inconvénient

- Négligence des événements importants (le protocole MAC doit inclure des mécanismes capables d'assigner une plus haute priorité ; lors de la détection d'importants événements).

#### Comparaison

Le tableau ci-dessous illustre la comparaison des solutions basées sur les réseaux véhiculaires par rapport au critère de la mobilité qui est estimé par la maîtrise de la communication inter-véhicule, la sécurité, la scalabilité ainsi que la gestion de la congestion.

Approche	Scalabilité	Précision	Sécurité	Gestion de la congestion
Contrôle de Congestion dans les Réseaux Véhiculaires [ 50]	Non	Oui	Les caractéristiques de sécurité sont prises en compte	une nouvelle méthode d'accès SR-CSMA est définie
La méthode VANet [49]	Elevée	Oui	Non	Oui

TABLE 3.1 – Comparaison des solutions basées sur les réseaux véhiculaires.

### 3.4.6 Optimisation des feux de signalisation

De nombreux auteurs se sont penchés sur l'étude d'intersections dotées de feux de circulation car, c'est la base de la régulation du trafic routier urbain. En fonction des cas, des théories et pratiques plus ou moins ingénieuses ont été mises en place, nous étudions dans ce qui suit les principaux travaux.

#### 3.4.6.1 La méthode de Zhou et al

Zhou et al proposent un algorithme de contrôle des feux adaptatif en se basant sur une intersection avec deux capteurs par voie (voir la figure 3.3), en précisant que le placement des capteurs électromagnétiques est dynamique. La constitution du plan de feux repose sur les combinaisons de mouvements qu'il est possible d'effectuer simultanément et sans conflits. Cette solution [52] va choisir la séquence de feux adaptée parmi ces combinaisons ainsi que la durée pour chacun des éléments de la séquence, en estimant le temps nécessaire à vider la plus grande file (ce temps étant borné par une valeur maximale). Dans ce modèle [52], tous les véhicules sont du même type (longueur), et chacun roule à la même vitesse. Le principe est d'utiliser un ensemble de facteurs afin de déterminer un plan de feux cycle après cycle. Ces derniers étant fixés par priorités :

- Prendre en compte les combinaisons possédant une ou plusieurs voies avec des véhicules d'urgence.
- Prendre en compte le niveau de faim<sup>1</sup>, qui va permettre la sélection d'une combinaison de voie si cette dernière n'a pas été sélectionnée depuis un certain temps et qu'au moins une voiture y attend.
- Puis, la combinaison ayant le temps d'attente le plus élevé.
- Enfin, la combinaison ayant la plus grande file.

#### Avantages

- Prend en compte une distance dynamique pour le positionnement des deuxièmes capteurs (Ces derniers ne sont pas fixes).
- Prend en compte plusieurs facteurs (avec des priorités) lors de la détermination du plan de feux.

#### Inconvénients

- Ne procède pas à la gestion de l'énergie des capteurs.
- Elle n'inclue pas la gestion du trafic en dehors des intersections.

---

1. Vient du terme famine, ce qui signifie donner la priorité à une seule file sans prendre en considération les autres.

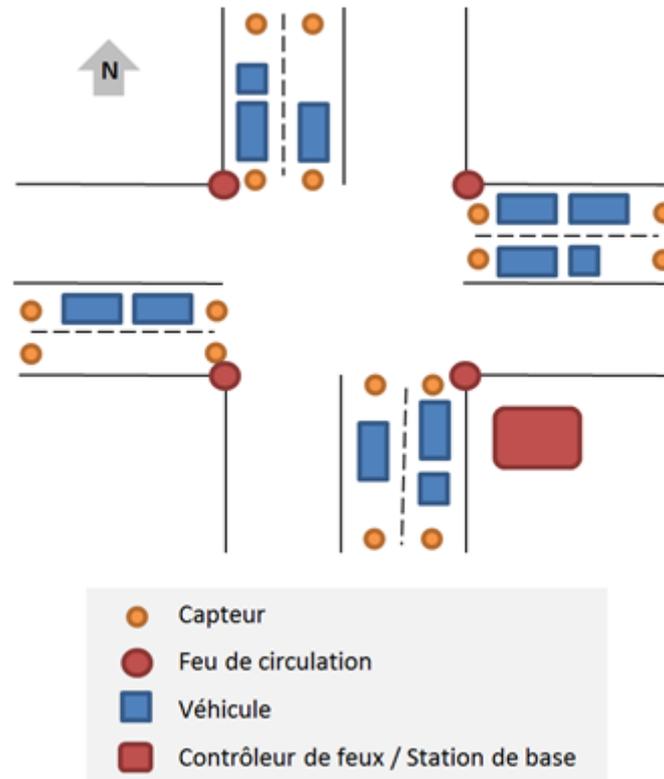


FIGURE 3.3 – Intersection avec deux capteurs par voie.

### 3.4.7 La méthode de Zou et al

Zou et al proposent une approche assez intéressante, afin de mesurer les arrivées. Ils utilisent un modèle [?] incorporant uniquement un capteur par direction (donc quatre capteurs pour une intersection) et posent l'hypothèse réaliste que ces derniers sont capables de détecter les variations du champ magnétique terrestre sur cinq mètres. Ainsi, en mettant un capteur, en bordure de route, avant chaque feu de l'intersection, leur modèle [53] est capable de comptabiliser le nombre de voitures empruntant chacune des voies. Cet unique paramètre permet d'établir la durée des feux selon des intervalles différents. Les auteurs [53] définissent également un mécanisme d'économie d'énergie des capteurs : lorsqu'une direction a son feu au vert, alors le capteur correspondant se met en veille et se réveille lorsque le feu passe au rouge afin de comptabiliser les arrivées. Enfin, les auteurs [53] utilisent des données extraites directement du terrain afin de simuler l'efficacité de leur solution.

#### Avantages

- Prend en compte la gestion d'énergie.
- Minimise le nombre de capteurs à utiliser.

#### Inconvénients

- La portée de détection des capteurs limite le nombre de voies possibles pour une intersection (car il y'a un seul capteur pour une direction).

- De plus, il y'a possibilité d'avoir des pertes de données à cause du nombre de capteurs placés par direction.

### 3.4.8 Algorithme distribué pour desintersection smultiples

Cette solution [51] propose un algorithme distribué nommé TAPIOCA (disTributed and Adaptative IntersectiOns ControlAlgorithm) qui permet de gérer les durées des feux verts des intersections à STI. Cette méthode [51] repose sur l'utilisation des RCSFs. Un tel algorithme [51] est réparti sur plusieurs intersections afin de détecter les mouvements des véhicules. Cela s'effectue en six étapes. Durant la première étape, chaque nud capteur compte les arrivées en enregistrant les signatures électromagnétiques (les variations du champ magnétique terrestre) de chaque véhicule. Lorsque l'étape d'inventaire se termine, chaque nud transmet sa liste de signatures à l'agrégateur (nud maitre) qui gère sa direction. Par la suite, les agrégateurs comparent les arrivées et départs sur chaque voie et évaluent le nombre de véhicules restant sur chacune d'elles afin de pouvoir orienter de façon efficace et optimale des véhicules pouvant emprunter différentes directions. Durant la dernière étape, les nuds maîtres devront envoyer les informations recueillies aux intersections voisines. Cette étape a pour but d'estimer le temps nécessaire pour passer d'une intersection à l'autre. Ce délai sera utilisé pour configurer le processus de synchronisation des feux verts, ce qui permettra une détection précoce des prochaines congestions.

#### Avantages

- Cet algorithme est fort, puissant et productif. D'une part, parce qu'il opère sur plusieurs intersections et d'autre part, il permet de réduire le problème de congestion.
- Il est efficace, dès lors qu'il permet de réduire le temps d'attente.
- La taille des files d'attentes est assez importante, ce qui permet de gérer un trafic fort en densité.

#### Inconvénients

- L'un des inconvénients majeur de cet algorithme [51] est qu'il ne prend pas en compte plusieurs facteurs. En effet, il aurait été intéressant de prendre en considération les véhicules prioritaires.
- " De plus, il serait judicieux d'y inclure une stratégie de tolérance aux pannes afin de diminuer le taux de perte ainsi qu'une stratégie d'économie d'énergie.

### 3.4.8.1 Système de priorisation des véhicules particulier à base des RCSFs

Dans ce travail [34], les auteurs proposent un système adaptatif pour le trafic des intersections qui est basé sur les réseaux de capteurs sans fil. Le contrôleur des feux d'une intersection peut communiquer avec ceux des intersections voisines afin d'échanger les informations concernant le trafic. Les auteurs ont contribué à la priorisation des véhicules particuliers tel que les véhicules des services d'urgence. A partir du son produit par ces derniers, les capteurs déployés peuvent détecter leur présence. Ils sont de taille minuscule et consomme moins d'énergie, et ce grâce à l'utilisation de l'énergie solaire. Le but principal de cette solution est de rassembler les informations sur le mouvement des véhicules prioritaires en vue de leurs éclairer les chemins de destination.

#### Avantages

- Dans cette méthode les auteurs gèrent un réseau de multiples intersections.
- Cette étude se base sur les véhicules prioritaires.

#### Inconvénients

- Les auteurs ne gèrent que les priorités, ils ont carrément négligé les autres véhicules. 'utilisation d'un seul capteur par direction peut engendrer une perte d'information substantielle.
- Cette approche est très intéressante, quoiqu'il n'y a aucune démonstration proprement dite.

#### Comparaison

Nous constatons, qu'aucun de ces modèles ne répond parfaitement à l'ensemble des contraintes que peut regrouper la problématique de la congestion urbaine. Cela est dû au fait que chaque modèle détaille en général un seul aspect sans aborder l'ensemble de la problématique. Cet éparpillement opère également sur les mesures de performances : les simulateurs ne se ressemblent pas, donc ils n'ont pas les mêmes points de mesure, ce qui nous empêche d'effectuer des comparaisons de performances. C'est pour cela, que nous nous contenterons de comparer leurs caractéristiques sans trop s'intéresser aux performances.

Méthodes/ caractéristiques	Nombre de capteurs	Position	Gestion du temps des feux	Gestion énergé- tique des capteurs	Facteurs pris en compte	Remarque	Simula
Zhou et Al [52]	2.par voies	Au niveau du feu et avant	Dynamique	Non détaillée	Multiples par priorités	Lourdes hypothèses	ISensM
Zhou et Al [53]	2.par voies	Bordure de la route avant le feu	Logique Floue	Prise en compte	Nombre de véhicules	Infras- tructure limitée	Calculs sur le terrain
TAPIO- CA [51]	Plusieurs	Non détaillée	Dépend du temps entre 2 inter- tions	Non détaillé	Nombre de véhicules	Détection précise de conges- tions	SUMO
Système de priorisation des véhicules particuliers à base des RCSFs [34]	1 par direc- tion	environ 400 mètres avant l'inter- section	Dynami- que	prise en compte	véhicules piori- taire	détection de véhicules piori- taires	-

TABLE 3.2 – Comparaison des approches basées sur la gestion des feux de signalisation.

### 3.5 Conclusion

Les STI sont de plus en plus utilisés et ce dans un vaste horizon. En effet, ils sont utilisés par les pouvoirs publics pour réguler le trafic routier, par les entreprises pour gérer des flottes de véhicules ou par de simples particuliers pour organiser leurs déplacements.

Tout comme un ordinateur ne peut fonctionner sans logiciels, ce genre de systèmes doit être assigné à coopérer avec d'autres outils, tel que les RCSFs afin de produire des résultats en temps réel. Ils pourront alors, arbitrer des situations plus que complexes telle que la régulation de la

congestion urbaine. Après avoir survolé les divers travaux effectués dans le but d'administrer le trafic routier, la solution sur laquelle nous nous obliquons dans notre étude est l'optimisation des feux de signalisation. Le but étant de choisir les phases et leurs durées de façon à ce qu'un maximum de voitures puisse circuler à une intersection. Il faut de plus synchroniser les feux de différentes intersections pour améliorer la fluidité du trafic global. Ceci n'est pas une tâche triviale et l'explication de cette approche se fera en détails dans le chapitre suivant.

## CHAPITRE 4

# RÉGULATION DU TRAFIC ROUTIER SUR DES INTERSECTIONS MULTIPLES CONTIGUËS

### 4.1 Introduction

L'industrie des transports est un acteur important de l'économie mondiale. Des millions d'emplois sont touchés de près ou de loin par cette manufacture. De plus, le nombre de véhicules sur terre ne cesse d'augmenter. Tout cela entraîne un lot de problèmes, notamment au niveau de la sécurité routière et de la pollution. Depuis des décennies, des compagnies privées et des organisations publiques se penchent sur ces problèmes.

Outre l'amélioration du confort et de la qualité de conduite, la recherche dans ce domaine vise présentement à régler les principaux problèmes causés par ce très grand nombre de véhicules sur terre, à savoir : diminuer le nombre d'accidents, diminuer le trafic routier dans les grandes villes et réduire la pollution.

Un autre problème majeur qui suscite l'intérêt d'être traité est la gestion de la congestion urbaine par l'optimisation des feux de signalisation. Le réseau routier est constitué de nombreuses intersections qui représentent des goulots d'étranglement pour le flux du trafic. Ces intersections sont généralement équipées de feux de signalisation, ce qui permet de gérer la congestion urbaine. Cependant, ces feux ne sont pas toujours efficaces face à la demande croissante des automobilistes qui empruntent le réseau routier et ils tiennent rarement compte des changements dynamiques dans le flux du trafic. Une solution est d'utiliser la communication route-à-infrastructure pour acquérir plus d'information sur l'état du trafic et modifier le fonctionnement des feux en conséquence.

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord aborder le problème du trafic routier et de la congestion urbaine. Par la suite, nous éclaircirons quelques notions relatives au sujet traité.

Enfin, nous présenterons une nouvelle approche qui a pour but de régulariser le trafic routier et de diminuer la congestion et ce, grâce à l'optimisation des feux de circulation.

## 4.2 Le trafic routier et la congestion

Pour plusieurs grandes villes dans le monde, le trafic routier et la congestion font partie du quotidien et tout laisse à croire que la situation n'ira pas en s'améliorant au cours des prochaines années. En effet, le trafic routier est un phénomène complexe d'une part en raison du nombre élevé d'acteurs qui y participent, d'autre part à cause du caractère très maillé du réseau sur lequel il se déroule [28].

Le phénomène le plus marquant dans le trafic routier est la congestion qui alimente de nombreuses discussions d'usagers. Pour mieux comprendre la congestion, il faut garder présent à l'esprit que c'est un phénomène qui survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de l'infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure (telles que les intersections), formant ainsi un bouchon. Ces véhicules excédentaires seront à chaque instant plus nombreux qu'à l'instant précédent. Comme chaque véhicule occupe une certaine longueur de la voie, la longueur de la file d'attente ne fera que croître en proportion du nombre de véhicules présents dans cette file d'attente [29].

### 4.2.1 Causes de l'émergence du problème de la congestion

La congestion urbaine vient principalement de l'augmentation massive du nombre de véhicules personnels au cours des dernières décennies. Les infrastructures routières ont vite atteint leurs capacités maximales et la construction de nouvelles routes est limitée par des contraintes politiques, économiques, sociales et environnementales.

La congestion routière est devenue un problème chronique. On en impute aussi parfois la cause de celle-ci aux travaux routiers récurrents qui créent des entraves à la bonne circulation.

De plus, quand les voitures sont proches les unes des autres, il suffit qu'un conducteur freine brutalement pour faire freiner en cascade tous les véhicules qui le suivent et propager ainsi un ralentissement, voire même un arrêt du trafic sur une certaine longueur. Quand le premier conducteur redémarre, de nouvelles voitures sont venues s'agglutiner et le bouchon se déplace vers l'arrière comme une onde, par un effet récursif.

Outre, plusieurs événements peuvent provoquer ou aggraver la congestion, nous citons : les accidents, les voitures en panne, les stationnements gênants, les conditions météorologiques mauvaises [28,30]

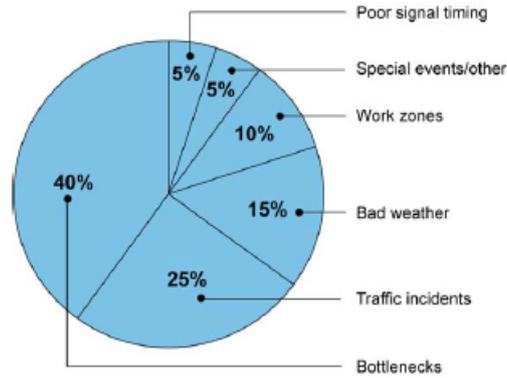


FIGURE 4.1 – Causes de la congestion dans les routes à grande circulation

## 4.2.2 Définition des variables du trafic routier

### 4.2.2.1 Variables individuelles

En plus de la position à un instant donné et de la date de passage en un point, on peut mesurer la vitesse (à un instant précis) ainsi que l'accélération. Ces variables sont relatives à l'évolution du véhicule le long de la route[28, 29, 31].

- La position ( $X$ ) d'un véhicule mesurée à un instant est notée  $X(t)$ .
- La vitesse ( $V$ ) d'un véhicule est la dérivée de la position par rapport au temps :

$$V(t) = dX(t)/dt \quad (4.1)$$

- L'accélération ( $A$ ) est la dérivée de la vitesse d'un véhicule par rapport au temps et donc la dérivée seconde de la position par rapport au temps :

$$A(t) = d^2X(t)/dt^2 = dV(t)/dt \quad (4.2)$$

### 4.2.2.2 Variables concernant deux véhicules

Lorsqu'un véhicule suit un autre véhicule, on parle de véhicule suiveur et de véhicule leader(suivi). Nous pouvons les observer de deux manières complémentaires l'une de l'autre :

- En un instant  $t$  : dans ce cas, nous mesurons le temps séparant les passages des deux véhicules successifs.
- En un point  $x$  : dans ce cas, nous mesurons la distance entre ces deux véhicules. Ici peut intervenir la longueur du véhicule.

### 4.2.2.3 Variables concernant le trafic routier

Un flot de véhicules est l'ensemble des véhicules parcourant une voie à une période donnée. Il est composé de véhicules divers par leurs caractéristiques physiques (poids, longueur, puissance) et autres (vitesse désirée, nombre de passagers). Pour mesurer les flots de véhicules, nous nous intéressons à des variables globales dont les définitions sont données ci-dessous [28, 29, 31].

- **Débit du trafic (Q)** : le calcul du débit est important puisqu'il mesure la capacité et l'efficacité d'une route ou d'un itinéraire donné.

$$Q = \text{vitesse}(V) * \text{densité}(D) \quad (4.3)$$

Autrement dit : le débit est le nombre  $N$  de véhicules passant pendant une période  $\Delta T$  en un point  $x$ . Il est exprimé en nombre de véhicules par unité de temps (véh/h ou véh/s généralement).

D'où :

$$Q = N/\Delta T \quad (4.4)$$

- **La densité (D)** : est le nombre  $N$  de véhicules situés entre  $x$  et  $x + \Delta X$  à un instant  $t$ . Celle-ci est exprimée en nombre de véhicules par unité de longueur (véh/km ou véh/m).

$$D = N/\Delta X \quad (4.5)$$

- **Temps de parcours** : le temps de parcours d'un véhicule entre un point  $A$  et un point  $B$  est trivialement le temps qui lui est nécessaire pour relier l'un à l'autre. Dans des conditions parfaitement stationnaires avec tous les véhicules évoluant à la même vitesse, le temps de parcours du flux est par définition celui de chacun des véhicules qui le composent. Lorsque ces conditions ne sont plus respectées, les temps de parcours sont susceptibles de varier d'un véhicule à l'autre.
- **Goulot d'étranglement** : une autre notion importante sur le débit du trafic est le principe du goulot d'étranglement. Cela se produit lorsqu'il y a un rétrécissement, un passage à une seule voie, une accentuation de la pente, un accident, etc. Si le volume du trafic demeure en dessous de la capacité d'écoulement du goulot, l'allongement du temps de parcours sera faible. Cependant, si la demande du trafic excède durablement la capacité du goulot, les délais résultants seront importants. Cela signifie que pour calculer le débit maximum d'un itinéraire, il faut d'abord calculer le débit de chaque tronçon de l'itinéraire puis de chaque jonction. On prend ensuite le débit le moins élevé et ce nombre

représente le débit maximum de l'itinéraire.

- **Relation demande-vitesse-débit** : 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 entraînera d'abord une légère diminution puis, progressivement, une diminution plus forte de la vitesse instantanée.

### 4.3 Gestion de multiples intersections par optimisation des feux de signalisation

L'obstacle majeur des intersections est qu'elles forment des goulots d'étranglement dans les routes sur lesquelles elles sont placées. Il est donc évident que pour éviter les collisions et assurer la sécurité des véhicules qui empruntent l'intersection, des systèmes doivent être mis en place pour gérer la circulation aux jonctions du réseau. Que ce soit des panneaux d'arrêts, des panneaux pour céder le passage ou des feux de signalisation, ces systèmes dictent la priorité de passage et indiquent qui peut entrer sur l'intersection et sous quelles conditions. De ce fait, une demande de trafic excédant durablement la capacité d'écoulement du goulot qui provoquera des délais importants pour les véhicules empruntant l'intersection. De plus, étant donné que le débit maximal d'un itinéraire s'égalise à celui de son point critique, il est primordial d'optimiser la circulation aux intersections pour améliorer la fluidité globale du réseau. Ce qui nous amène à nous incliner sur l'optimisation des feux de signalisation disposés au cœur des intersections.

#### 4.3.1 Conception d'une intersection

La figure (4.2) montre un modèle général de cinq intersections unies. Une intersection est composée de quatre directions avec un nombre fixé de voies pour chacune. Dans ce cas, les voies pour tourner à gauche sont séparées des voies allant tout droit ou à droite, ces deux

derniers mouvements étant confondus. Ce modèle possède l'avantage de pouvoir être adaptable à de nombreuses situations. Plusieurs facteurs doivent être pris en compte pour la conception d'une intersection. Nous devons en particulier considérer :

- **Le type de routes qu'elle relie** : dans ce cas, des routes régionales.
- **La quantité du trafic qui y circule** : trafic aléatoire (indéterminé).
- Le nombre de voies sur chacune des routes : nous étudions le cas de deux voies par direction.
- **Le type de jonction choisi** : est une intersection avec des feux de signalisation, il faut donc concevoir un système de contrôle des feux.

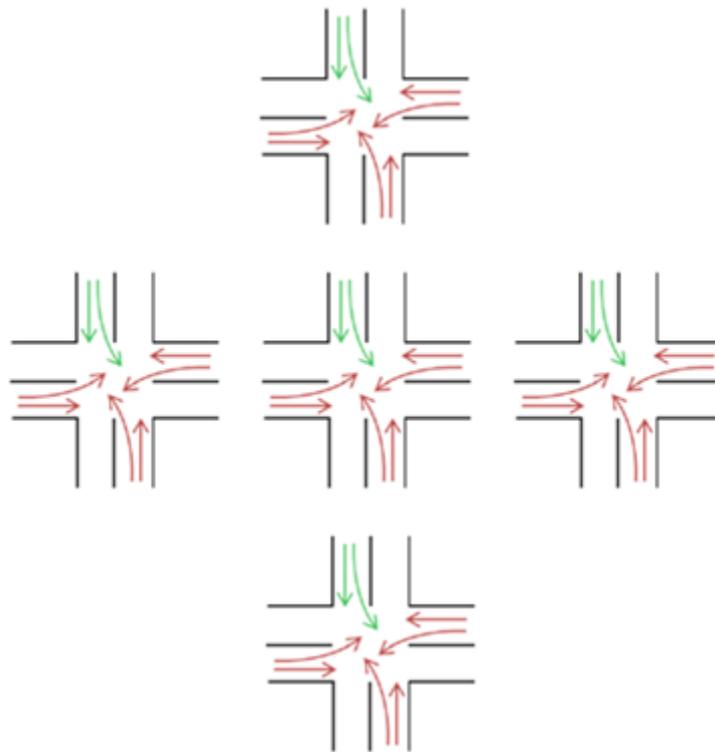


FIGURE 4.2 – Modèle général constitué de cinq intersections.

## 4.3.2 La gestion des feux de circulation

Dans cette section nous menons notre étude sur les systèmes de gestion des feux de circulation. Une nomenclature est nécessaire quant à la compréhension de la suite du travail.

### 4.3.2.1 Le contrôleur de feux

Les feux de circulation d'une intersection sont généralement gérés par un centre de contrôle, qui possède un certain nombre de propriétés en fonction des constructeurs. Un contrôleur

n'est rattaché qu'à une seule intersection. Les principaux éléments d'un contrôleur sont les suivants :

- Une unité d'énergie.
- Une unité de détection, connectée à des éléments de contrôle (détecteurs).
- unité de contrôle, donnant l'ordre d'enclenchement des feux.
- Une unité d'avertissement rapide, réagissant en cas d'erreur critique (par exemple : orange clignotant sur l'ensemble des feux).
- Une unité de gestion des conflits, qui est programmée avec les combinaisons de feux verts autorisés (matrice de conflits) et qui vérifie les données envoyées par l'unité de contrôle qui fait appel à l'unité précédente en cas d'erreur ou de faute constatée sur l'un des feux.
- Une unité d'administration, pour prendre le contrôle de l'intersection (par la police par exemple).

Un contrôleur de feux possède un plan de signalisation qui décrit les différentes phases disponibles.

- **Définition d'une phase :** une phase consiste en la description des différentes transitions possibles que les véhicules peuvent effectuer pour chaque voie de l'intersection. Les phases décrivent aussi les lumières qui doivent être affichées aux véhicules pour leur indiquer les droits de passage. Evidemment, les transitions permises dans chacune des phases doivent être non conflictuelles. Une phase est dite spéciale quand elle a pour seul but de favoriser l'écoulement d'un mouvement tournant (véhicules prioritaires). Elle est dite saturée lorsqu'un véhicule au moins de cette phase est contraint d'attendre plus d'un cycle pour franchir l'intersection [28,33].
- **Définition d'un cycle :** un cycle correspond à l'enchaînement d'un ensemble de phases. Ce cycle est généralement fixé au minimum à 45 secondes et ne dure pas plus de 90 secondes pour éviter de perdre du temps à arrêter et redémarrer le trafic. Classiquement, un cycle déroule l'ensemble des phases et mouvements possibles, de manière à ce que toutes les voies aient au moins une fois le feu au vert. Les indications des feux : vert, orange et rouge se succèdent à l'intérieur d'un cycle [2,33].
- **Définition d'un détecteur :** un détecteur est une technologie permettant de récolter et transmettre des informations à un nœud traitant. Ce terme englobe donc les capteurs électromagnétiques et autres [2].

#### 4.3.2.2 Plan de signalisation

Un plan de feux correspond à la description d'un cycle donné, et définit les différentes phases que le cycle va dérouler ainsi que leur durée. Un exemple est donné sur la figure suivante où le plan de feux est constitué d'un cycle de deux phases [2].

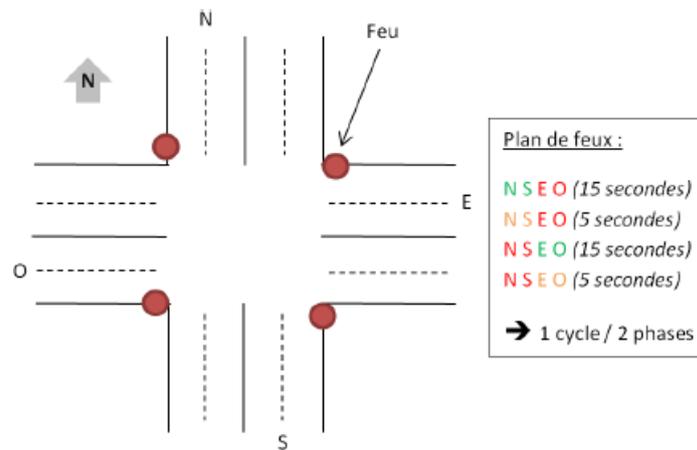


FIGURE 4.3 – Exemple dun plan de feu sur une intersection .

### 4.3.3 Les types de contrôle des feux de signalisation [2,28,30]

La gestion des feux de circulation est un problème qui a commencé à être étudié au début des années 1970. Il existe deux façons différentes de gérer les changements de phases d'un plan de signalisation : régulation à plan de feux fixe et régulation adaptative. Les contrôleurs à temps fixe sont intuitivement simples et fonctionnent avec l'heure de la journée. Ce choix de contrôle est moins coûteux et plus logique pour un réseau routier où le trafic est stable et prévisible. L'inconvénient majeur de celui-ci est que son efficacité peut devenir très faible lorsque le flux du trafic est instable (accidents, mauvaises conditions météorologiques).

La régulation adaptative permet des changements des durées de phases, celle-ci est basée sur la demande du trafic. Pendant l'écoulement de la circulation, le temps du feu vert d'une voie peut être prolongé par une unité d'extension si un nouveau véhicule est détecté pour cette phase. Cela donne aux feux de signalisation, l'opportunité de s'adapter à la demande de la circulation. Nous pouvons citer quelques exemples de ce genre de contrôleur : GERTRUDE<sup>1</sup>, SCOOT<sup>2</sup>, SCAT<sup>3</sup> et PRODYN<sup>4</sup>.

Dans notre cas - spécifiquement cas des STI - l'utilisation des contrôleurs avec capteurs permet d'améliorer la gestion de la circulation localisé sur une zone bien précise (exemple : intersection), et permet également une gestion plus souple de la

1. Mis en place à Bordeaux en 1976, puis à Reims, Lisbonne, et à Paris en 1990.

2. Opérationnel dans plusieurs villes en Grande-Bretagne : Glasgow, Coventry, Londres et introduit à Santiago au Chili et à Manama.

3. A Sydney, puis étendu à Melbourne, Canberra, Adélaïde, en Nouvelle-Zélande

4. Mis en place à Toulouse.

communication entre les éléments voisins. Ces contrôleurs utilisent, des détecteurs (tel que les boucle électromagnétiques<sup>5</sup>) afin de déterminer l'état du trafic routier. Ce genre de contrôleurs est nettement plus avantageux dans la mesure où il a compte un énorme gain surtout en terme de coût. En effet, plusieurs détecteurs à faible coût sont préférables qu'une grosse unité de calcul à coût élevé.

#### 4.3.3.1 Les modes de fonctionnement des contrôleurs

Les différents types de contrôleurs peuvent fonctionner sous divers modes. Outre le contrôle manuel, on distingue généralement le contrôle automatique, le contrôle adaptatif et le contrôle coordonné. Dans les faits, ces modes ne sont pas toujours distincts et peuvent se combiner à plusieurs titres, voire même se substituer l'un à l'autre [36].

- **Mode manuel** : dans ce cas, c'est un individu qui actionne le changement d'état des intersections. C'était le cas des premiers feux de circulation. Aujourd'hui encore, les feux peuvent fonctionner en mode manuel si la situation l'exige, ou également en mode semi-manuel (ou semi-automatique).
- **Mode automatique** : ce mode n'exige aucune intervention extérieure. Les états successifs d'un cycle se déroulent séquentiellement suivant les plans de feux mis en place dans le contrôleur. Ce mode est aussi appelé : fonctionnement en cycles fixes.
- **Mode adaptatif** : le mode adaptatif permet l'adaptation de la durée de l'intervalle vert, et par conséquent la modulation de l'ensemble des phases d'un cycle, en fonction de la demande, c'est-à-dire en fonction des variations du trafic. Ainsi, un feu vert peut être allongé pour écouler le flux d'une voie où s'écoule un trafic plus important que dans les voies adjacentes. Un autre exemple d'adaptation est la priorité donnée aux véhicules des services d'urgences : leur arrivée dans une intersection déclenche soit l'allongement de l'état du feu vert, soit la réduction de l'intervalle rouge sur la voie qu'ils empruntent.
- **Mode coordonné** : ce mode signifie que plusieurs contrôleurs, donc plusieurs intersections, sont soumises à une même stratégie de régulation. Pour notre étude, nous allons nous focaliser sur ce mode car, il permet la régulation d'axes de circulation, plus connue sous l'expression d'onde verte. La manœuvre consiste à coordonner les phases de différentes intersections d'un même axe routier afin de rendre plus confortable et plus

---

5. C'est un capteur utilisé pour mesurer les variables globales telles que le débit et le taux d'occupation. Ce type de capteur peut également être utilisé dans le but de comptabiliser le nombre de véhicules passant sur la boucle.

fluide la progression des véhicules, c'est-à-dire de réduire leurs arrêts aux intersections, du moins s'ils respectent une vitesse moyenne définie par le gestionnaire des feux qui permet alors de profiter de l'onde verte.

#### 4.3.4 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 ; en effet, la synchronisation des feux dans une seule direction sera désavantageux pour les voitures circulant en sens inverse. De plus, la synchronisation d'une ligne influence les feux de signalisation sur l'intersection de chacune des routes croisant cette ligne. Cependant, à quel point faut-il désavantager les autres usagers et que faire lorsque deux parcours très achalandés entrent en conflit à une ou plusieurs intersections ?
- **la fluidité** : notamment sur les parcours les plus en demande à des heures variables ; 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. Ce problème ne s'arrête pas juste là, nous pourrions également avoir une situation beaucoup plus compliquée ; quand les quatre côtés de l'intersection ou plus d'un côté sont rempli de voitures prioritaires. Si c'est le cas, ça devrait être une situation ambiguë pour le contrôleur de feux.

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 route-à-infrastructure et la communication entre diverses intersections, prenant en compte plusieurs facteurs (gestion de la famine, gestion des véhicules prioritaires). En plaçant un agrégateur (capteur spécifique) sur chaque contrôleur (à chaque intersection) celui-ci sera susceptible de gérer au mieux les feux de signalisation et permettra de détecter de manière précoce d'éventuelles congestions.

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 (agrégateurs) placés aux intersections doivent calculer 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.

#### 4.3.4.1 Architecture du réseau routier

Nous considérons le modèle d'intersection illustré dans la figure (4.4). Chaque intersection est composée de quatre directions (N, S, E, O). 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.

Nous incorporons six capteurs par direction (trois capteurs avant les feux et les trois autres après les feux de la même intersection). Nous posons l'hypothèse réaliste que ces derniers sont capables de détecter les variations du champ magnétique terrestre sur cinq mètres voir plus [2], sachant qu'une route constituée de deux voies fait 6.5m de large. Les nœuds source (NS) sont placés séparément à une distance connue (100 à 150 m) avant les feux (mesurent les arrivés sur la route), les nœuds destination (ND) se situent juste après les feux (mesurent les départ des véhicules) et en fin les nœuds intermédiaires (NI) qui seront installés après les nœuds NS et avant les feux (comptabilisent le nombre de voiture sur la voie de gauche). Chaque intersection dispose d'un centre de contrôle (infrastructure) qui définit et applique les séquences de feux appelées cycle. Les nœuds NS et ND ne communiquent pas entre eux, ils transmettent les informations directement à l'infrastructure. Cette dernière analyse les informations puis prend et communique les décisions.

Les intersections communiquent entre elles à travers le réseau local formé par les stations de base (les contrôleur de feux). Une intersection I1 envoie à sa voisine I2 des informations concernant les véhicules partant dans sa direction afin d'éviter une éventuelle congestion. Les nœuds ND sont la source des données de cette transmission.

Pour qu'une intersection puisse envoyer des informations à ses voisines, il serait judicieux d'identifier non seulement le nombre de véhicules se dirigeant vers celles-ci (intersections voisines) mais aussi, l'heure de leurs arrivées, leurs types (véhicules d'urgences ou autres) et leurs vitesses respectives. Cela permet d'avoir une évaluation de la longueur des files d'attente et les priorités à prendre en compte. Dès lors que les magnétomètres sont capables d'identifier les véhicules à travers une signature électronique, il est donc possible d'obtenir ces informations avec exactitude.

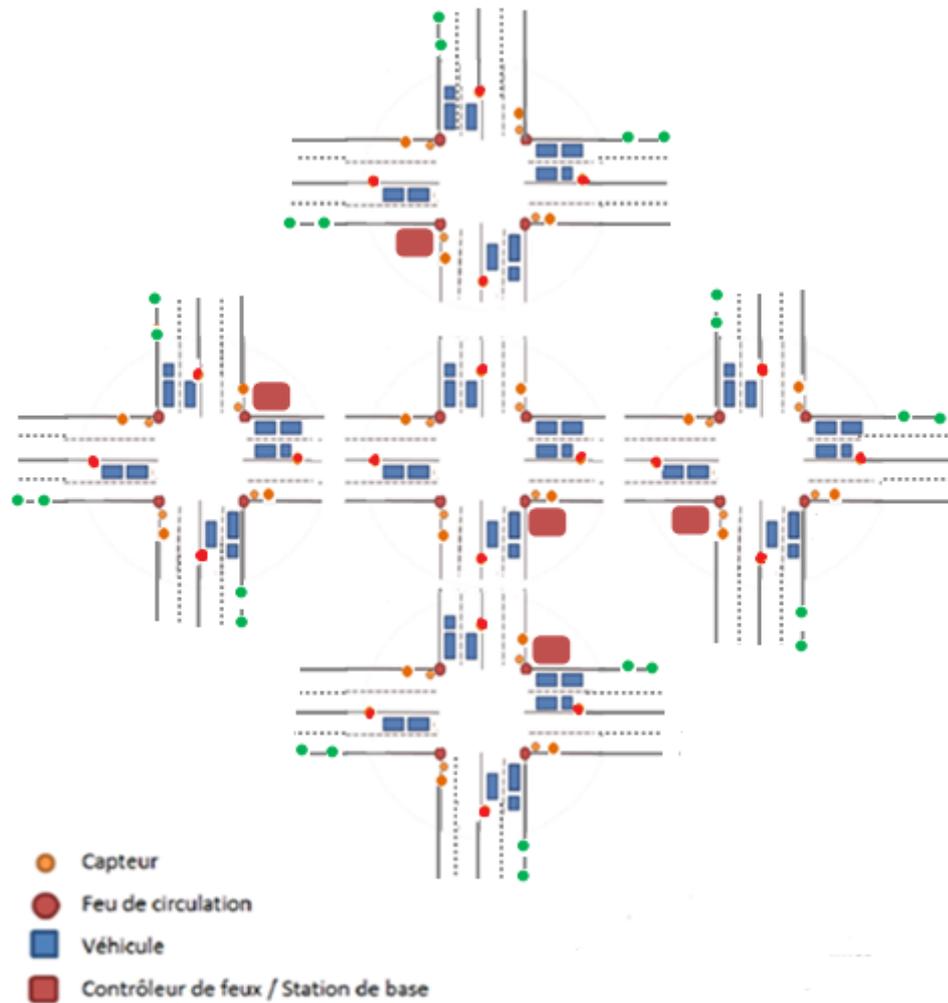


FIGURE 4.4 – Architecture du RCSF déployée sur de multiples intersections.

#### 4.3.4.2 Type de capteurs utilisés

Le développement des technologies sans fil et les différents types de capteurs existants nous offre l'opportunité de choisir le type de capteur adéquat avec l'architecture proposée et qui sera capable de répondre aux mieux quant aux besoins.

Dans notre cas, nous avons jugé bon de recourir à l'utilisation des capteurs électromagnétiques basés sur la récupération d'énergie. Il est possible de transformer et d'exploiter certaines sources d'énergie provenant de la température ambiante, des ondes radio, des vibrations, du magnétisme, des micro-ondes mais aussi de sources plus conventionnelles comme le photovoltaïque par exemple. Ce choix n'a pas été pris par hasard, ces capteurs sont moins sensibles aux mouvements de l'asphalte

(bitume utilisé pour le revêtement de la chaussée) qui se déforme près des bandes d'arrêt, ce qui leur confère une durée de vie plus importante que celle d'une boucle de détection électromagnétiques. Lorsqu'un large objet métallique (véhicule) passe dans le champ d'un tel capteur, ce dernier enregistre les variations produites sur le champ magnétique terrestre. Ces variations permettent avec une très grande fiabilité de :

- Détecter des véhicules,
- Connaitre le type des véhicules,
- Mesurer la vitesse des véhicules,
- Enregistrer l'heure d'arrivée des véhicules.

Les noeuds capteurs déployés le long de la route sont de tailles minuscules et ils ont une faible consommation d'énergie. Ils utilisent comme source soit l'énergie de la batterie soit l'énergie solaire. Ils sont capables de tirer profit de la lumière solaire et de l'utiliser dans les bonnes conditions climatiques (dans les journées claires et lumineuses) et quand le temps est nuageux ou durant la nuit ils fonctionnent à base de la capacité de la batterie. Parmi les avantages qui marquent l'usage de cette technologie, nous citons :

- La réduction de l'énergie électrique consommée.
- La simplicité de la mise en oeuvre.
- Le faible coût de l'équipement et surtout le faible coût de l'installation et de la maintenance.
- Une durée de vie plus importante.

#### 4.3.4.3 Les types de communication

Dans notre approche, nous avons deux types de communication à gérer, des communications route-à-infrastructure et des communications infrastructure-à-infrastructures.

- **Communication route-à-infrastructure** : notre solution repose sur l'utilisation de la communication sans fil, principalement par le moyen des ondes radio pour échanger des informations entre la route et l'infrastructure. Ce type de réseau est utilisé pour les applications où la performance est menacée par la congestion du canal.

### Le protocole d'accès utilisé :

Le protocole qui répond au mieux à nos besoins est le protocole IEC 14543-3-10. Cette norme gère non seulement, la consommation d'énergie mais aussi la portée du signal qui est très importante. La bande de fréquence utilisée est à 868 MHz. Le taux de transfert de ce dernier est élevé à 125kBits/s et la portée du signal à l'extérieur est à environ 300 m [37].

- **Communication infrastructure-à-infrastructure** : nous considérons que les infrastructures sont reliées entre elles par un réseau filaire (câbles coaxiales) et elles joueront le rôle des stations de base. Le protocole d'accès utilisé : Nous avons opté pour le protocole CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access/ Collision Detect) qui permet l'accès au support de transmission dans un réseau lié en étoile ou en bus. Cette méthode impose d'écouter le support physique de liaison pour déterminer si l'autre station n'est pas déjà en train de transmettre une trame de données, par détection d'une tension électrique ou par la présence d'une lumière. S'il n'y a pas d'émission en cours, elle lance sa trame toute en restant à l'écoute du canal. Dans le cas d'une collision le système se remet en attente pendant un délai aléatoire avant d'entamer une nouvelle séquence de CSMA pour tenter la réémission de la trame.

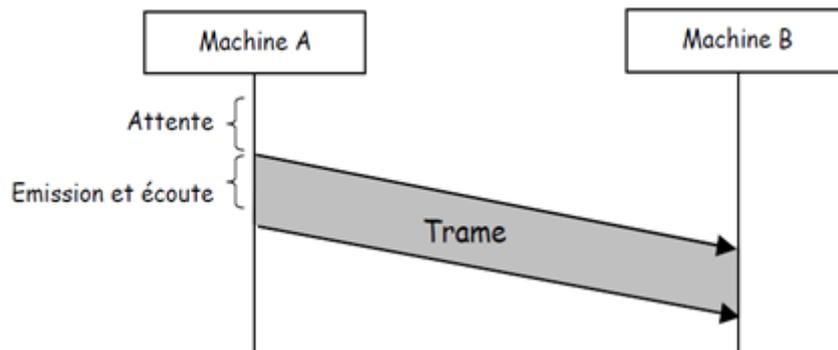


FIGURE 4.5 – Fonctionnement du protocole CSMA/CD.

#### 4.3.4.4 Démarche à suivre

Nous proposons une démarche qui permet de gérer de multiples intersections adjacentes. Toute intersection peut communiquer avec les intersections voisines à travers un réseau local. Les nœuds capteurs peuvent transmettre des données à l'infrastructure.

La démarche présentée ci-dessous est un algorithme distribué sur différentes intersections. Cette nouvelle méthode a pour but d'optimiser les feux de circulation.

Le cas traité est général, donc constitué de quatre intersections adjacentes.

- Détection de véhicules : durant la première étape, chaque nœud NS compte les arrivés sur la route par l'enregistrement des signatures électromagnétiques des véhicules. Quand le décompte est terminé, chaque nœud NS envoie sa liste à l'infrastructure. Quant aux nœuds NI, ces derniers envoient à l'infrastructure une liste contenant le nombre de véhicule qui se dirigent à gauche afin qu'elle puisse gérer ses phases et ses cycles. En ce qui concerne les nœuds ND, ils se trouvent à la sortie de l'intersection (l'entrés de la prochaine intersection), leurs rôles ne diffèrent pas de celui des nœuds NS, ils envoient le nombre de véhicules ainsi que leurs états (plusieurs données) à l'infrastructure de la même intersection.
- Une fois que toutes les données sont reçues :
  1. L'infrastructure compare les listes des départs et des arrivés afin d'évaluer le nombre de véhicules restant sur chaque voie.
  2. L'infrastructure évalue les destinations prises par les véhicules, car quand les véhicules sont détectés par les nœuds NS, ils peuvent prendre trois directions différentes (pour mettre en place une politique pouvant gérer au mieux les phases).
  3. L'infrastructure envoie les listes provenant des nœuds ND à l'infrastructure des intersections correspondantes.
  4. l'infrastructure enregistre aussi les listes (données à propos des véhicules se dirigeant vers cette intersection) reçues de la part des intersections voisines, ainsi que leurs états. A partir de ces données cette dernière pourra gérer ses cycles et ses phases grâce aux mises à jours.
- **Traitement** : le traitement le plus important c'est de maintenir le temps de chaque mouvement et de chaque direction afin de contrôler la congestion, non seulement au niveau local mais aussi en suivant l'état des intersections voisines, tout en tenant compte de certains facteurs à savoir : la longueur de la plus grande file d'attente, la gestion de la famine ainsi que la gestion des véhicules prioritaires. Cela inclus la définition des cycles, le nombre de phases et évidemment le temps attribué à chaque phase.
- L'infrastructure envoie toutes les informations nécessaires (nombre de véhicules allant dans la direction des autres intersections) aux autres qui lui sont contiguës.

#### 4.3.4.5 Description des phases

Pour en revenir à ce qui a été dit dans la section 4.3.3, une phase permet de vider des voies sources dans des voies de destination. Quoique, même si une connexion a le droit de passage, le nombre de véhicules qui vont transiger sur cette connexion peut être subalterne que la demande. Autrement dit, une phase représente un intervalle durant lequel une combinaison de feux verts va être activée. Les phases sont déterminées à partir des mouvements que chaque direction peut effectuer sans conflits. Les indications des feux : vert, jaune (orange) et rouge se succèdent à l'intérieur d'un cycle qui englobe les différentes phases. La transition entre deux phases distinctes se fait par une lumière jaune (négligeable). Cela donne assez de temps aux véhicules qui s'approchent de l'intersection pour s'arrêter et aux véhicules déjà engagés pour le traverser en toute sécurité.

- Le nombre de phases

Le nombre de phases dans un cycle est un rudiment décisif dans la fluidification du trafic routier. Plus le nombre de phase est petit, plus la gestion du temps des feux et des cycles est souple et commode. Les arrêts des véhicules seront également plus rares. Dans le cas général, le nombre minimum de phases est de quatre. Ceci, dans le cas où la densité du trafic routier est forte (il y'a congestion). Cela permettra de fluidifier le trafic dans de multiples intersections, notamment, lors des heures de pointes.

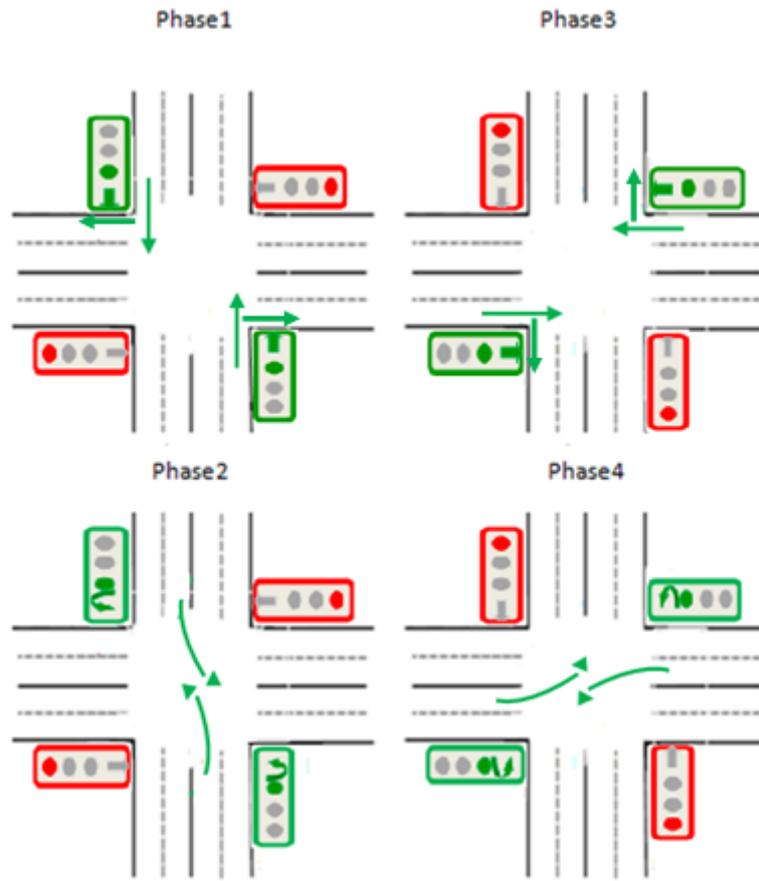


FIGURE 4.6 – du nombre de phases dans le cas de congestion.

Toutefois, il est possible de changer ce mécanisme et de réduire le nombre de phases à seulement deux. En effet, si les voies tournant à gauche sont peu chargées, il est possible de les confondre avec les autres mouvements (tout droit et à droite). L'établissement des phases est donc en premier lieu une question de charge sur les voies de gauche. Cela sera convenable dans le cas où il y'a moins de circulation (en dehors des heures de pointes).

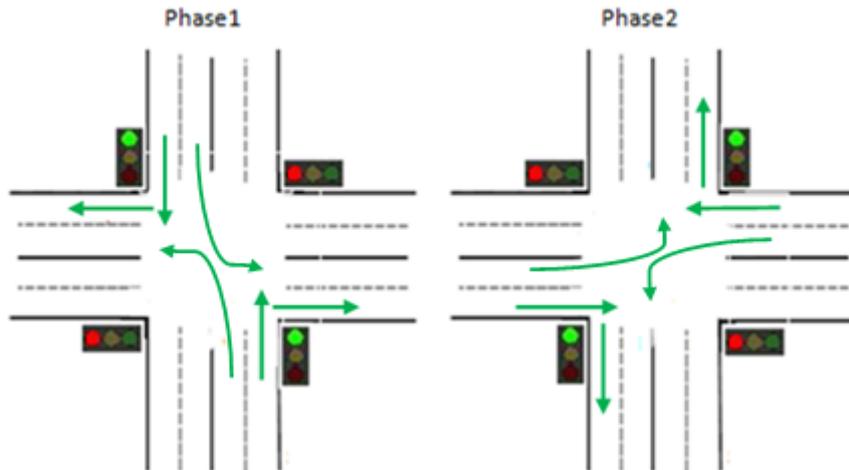


FIGURE 4.7 – Illustration du nombre de phases dans le cas de non congestion.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu en quoi consiste le problème de la congestion urbaine et comment elle peut être réduite. Nous avons aussi survolé différentes datations liées au trafic routier. Une des solutions pour diminuer la congestion urbaine est d'optimiser la circulation routière. Cela n'est guère une tâche simple d'autant plus si l'étude ce fait au niveau de multiples intersections. C'est d'ailleurs ce que nous nous somme efforcé d'étudier et cela nous a amenés à proposer une nouvelle approche appuyée par une démarche tentant à apporter un progrès omnipotent quant à la fluidité du trafic routier.

Au cours du chapitre imminent, nous entreverrons comment le problème de la congestion peut être traité et ce, en entreprenant une modélisation et une évaluation de performance de celui-ci .

# CHAPITRE 5

## MODÉLISATION ET SIMULATION DE L'APPROCHE

### 5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons clairement vu que la congestion routière constitue un problème réel notamment dans le quotidien des citoyens urbains. Cependant, il existe plusieurs techniques qui hasardent à réduire cette controverse. Comme la demande des usagers et le modèle du trafic routier changent constamment (environnement dynamique), il est difficile d'opérer des feux de signalisation de façon optimale. Toutefois, la solution proposée antérieurement vise à utiliser la communication route-à-infrastructure afin de récolter des informations en temps réel sur le trafic routier et contrôler ainsi les feux de signalisation.

De nos jours, le problème de l'affectation dynamique (environnements dynamiques) prend une importance considérable. En effet, il est au cœur du fonctionnement de tous les systèmes d'information routière qui se développent rapidement. La complexité de notre tâche est en grande partie due à la gestion des infrastructures. Elle se complexifie au fur et à mesure que le trafic augmente. Dès lors, la mise en œuvre de modèles mathématiques rigoureux est d'une nécessité absolue.

Ce chapitre porte sur la partie modélisation et simulation. C'est à ce niveau que le modèle que nous avons proposé sera présenté et expliqué plus en détail. Dans cette optique, nous étalerons également les résultats de notre simulation afin d'appuyer l'approche proposée à base des RCSFs.

## 5.2 Problème et modélisation

La modélisation d'un problème sous forme théorique permet d'utiliser des algorithmes afin de résoudre ce genre de problème. Dans le cas des feux de signalisation, l'agent qui contrôle (le contrôleur) une intersection doit observer l'environnement, c'est à dire l'état du trafic et poser des actions en contrôlant l'état des feux de signalisation.

### 5.2.1 Complexité du problème

Modéliser et résoudre le problème d'optimisation des feux de signalisation est une tâche plus qu'abstruse pour deux raisons majeures : l'espace d'états de chaque intersection est représenté par un ensemble énorme de variables continues et le choix d'actions est composé d'une multitude de paramètres. Prenons par exemple toutes les variables qui représentent l'état du trafic dans une ville quelconque ou qui sont susceptibles de l'influencer. Pour commencer, on peut y inclure toutes les voitures et leurs états dynamiques respectifs. Cela inclut la position, la vitesse, l'accélération, la direction et tous les autres paramètres rattachés au mouvement de chaque voiture. On pourrait aussi inclure l'état statique tel que le poids, la taille, la force du moteur, car ces paramètres influencent la vitesse d'accélération et de freinage des véhicules. Ensuite, il faudrait inclure tous les paramètres climatiques pouvant influencer les conditions routières, le trajet de chacun, etc. Il est vrai qu'il est exagéré d'inclure tous ces paramètres dans l'espace d'états d'une seule intersection et même dans l'état complet du système. Cependant, cela démontre que si l'on veut absolument tenir compte de tous les paramètres influençant l'état du trafic, le problème devient pratiquement impossible à résoudre. La question à poser est plutôt de savoir que garder dans l'espace d'états pour avoir une assez bonne description de l'état du trafic sans que cela devienne impossible à calculer par les machines ?

### 5.2.2 Modélisation de l'approche

En se basant sur les méthodes d'optimisation actuelles des feux de signalisation, nous concevons un agent (contrôleur) dynamique pour la gestion de multiples intersections prenant compte de divers facteurs.

### 5.2.2.1 Description de l'approche dynamique

Les méthodes conventionnelles de conception de systèmes de signalisation sont généralement composées de trois étapes inévitables. Celles-ci sont explicitées ci-dessous :

- Recueil d'informations statistiques sur la circulation au niveau des intersections.
- Calcul de la programmation optimale des lumières des feux de signalisation.
- Implantation de la programmation dans les feux des intersections.

Ces méthodes donnent d'excellents résultats lorsque le trafic correspond aux données recueillies. Cependant, comme nous l'avons précédemment signalé, ces systèmes de signalisation fixes ne s'adaptent pas aux changements.

La perception de notre approche se base sur le renforcement de la méthodologie précédemment citée, la rendant ainsi plus adaptative (réagit en temps réel). En utilisant les informations recueillies en temps réel par la communication route-à-infrastructure, l'agent placé sur chaque intersection calcule la programmation optimale correspondant au trafic actuel. L'objectif étant, d'utiliser un algorithme s'exécutant rapidement et permettant ainsi à l'agent de calculer à nouveau et autant de fois que nécessaire la politique optimale. De cette manière, il est possible de simuler un réseau routier comptant plusieurs d'intersections. De plus, la simulation d'une heure de trafic ne nécessite que quelques minutes, voir quelques secondes.

### 5.2.2.2 Modélisation d'intersections multiples

Lorsqu'une connexion croise physiquement une autre connexion, on dit que ces connexions sont conflictuelles ou ennemies. Si deux voitures empruntent simultanément ces deux connexions, il y a risque de collision. A l'inverse, lorsque deux connexions ne se croisent en aucun point, on dit qu'elles sont non conflictuelles ou amies. Des véhicules peuvent y circuler simultanément sans risque de collision. Le but d'un système de signalisation à une intersection est de gérer ces conflits entre les connexions. Ces systèmes indiquent à quels moments et sous quelles conditions un véhicule peut traverser l'intersection.

Pour une intersection avec feux de signalisation, la couleur des lumières indique quelles connexions ont le droit de passage et certaines règles du code de conduite spécifient les quelles ont la priorité. Par exemple, un véhicule tournant à gauche doit laisser passer les véhicules venant en direction opposée, à moins d'indication contraire. Bien entendu, une lumière verte autorise la circulation

alors qu'une lumière rouge l'interdit. Ainsi, à un instant  $t$ , certaines connexions ont le droit de passage et d'autres ne l'ont pas.

Dans la figure ci- dessous, les voies sources sont représentées par des numéros et les voies de destination par des lettres majuscules. A partir d'une voie source donnée, un véhicule peut atteindre une ou plusieurs voies de destination. Ces liens possibles sont appelés les connexions, chaque connexion représentant un lien entre une seule voie source et une seule voie de destination. Chaque voie peut aussi appartenir à plusieurs connexions.

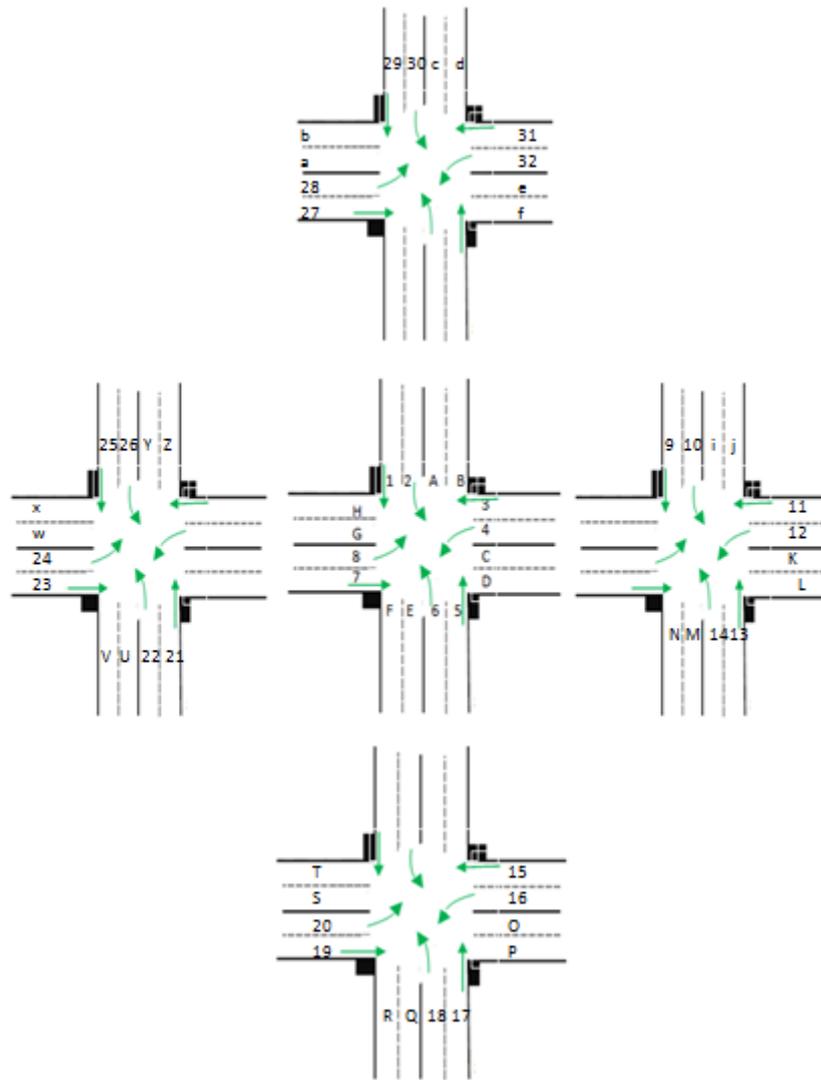


FIGURE 5.1 – Les connexions probables des véhicules.

### 5.2.2.3 Outils de modélisation

Ces outils sont nombreux, nous citons les plus fréquemment utilisés, à savoir : le contrôle par la logique floue, les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones, files d'attente

- **Contrôle par la logique floue** : la logique floue permet de mettre en place des degrés dans la vérification d'une condition et ne 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. L'inconvénient majeur de cette méthode est que 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 [2].

- **Les algorithmes génétiques** : les algorithmes génétiques appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné. Ces algorithmes ont comme inconvénients : en plus du nombre considérable de calculs qu'il faut effectuer, leurs paramètres sont difficile à déterminer [2,33].
- **Les 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 cet outil afin de gérer les feux de signalisation. Dans ce cas, il est question d'effectuer 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 [2].

Dans notre cas, nous utiliseront un autre outil très répandus. Il s'agit des files d'attente. Celles-ci peuvent être considérées comme un phénomène caractéristique de la vie contemporaine. Nous les rencontrons dans divers domaines d'activité (guichet de poste, trafic routier, central téléphonique, atelier de réparation,...).

### 5.2.3 La théorie des files d'attente

La théorie des files d'attente est particulièrement adaptée au cas de la gestion du trafic routier. Cette dernière appartient au domaine des probabilités et permet donc une gestion optimale des files d'attente (queues). Dans le cas de multiples intersections, une file d'attente est automatiquement créée lorsque les véhicules souhaitent obtenir un feu au vert. Avec cette théorie, il est plus facile de calculer des valeurs telles que le nombre moyen de véhicules en attente, en service, le temps moyen d'attente ou encore de séjour dans le système [2, 37].

#### 5.2.3.1 Structure de base d'un système de file d'attente (FA)

Le modèle général d'un système d'attente (et de service) peut être résumé comme suit : des "clients" arrivent à un certain endroit et réclament un certain

service. Les instants d'arrivée et les durées de service sont généralement des quantités aléatoires. Si un poste de service est libre, le client qui arrive se dirige immédiatement vers ce poste où il est servi, sinon il prend sa place dans la file d'attente dans laquelle les clients se rangent suivant leur ordre d'arrivée [38],[39].

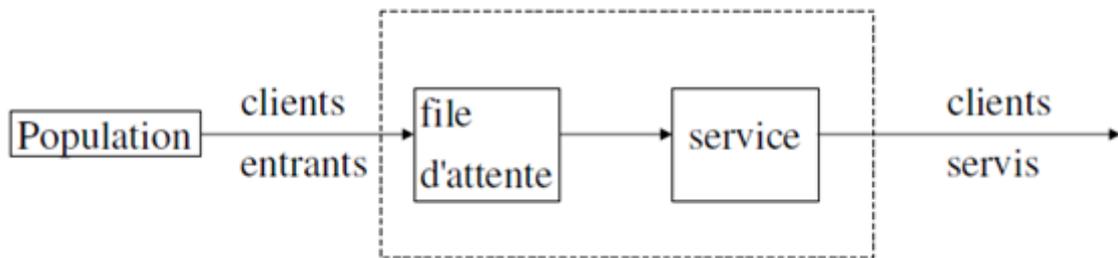


FIGURE 5.2 – Représentation de la structure de base d'une FA.

- **La population** : la population constitue la source de clients potentiels. Elle est caractérisée par son nombre d'élément (fini ou infini).
- **La file d'attente** : la file d'attente est caractérisée par le nombre maximum permis de clients en attente (fini ou infini).
- **Les clients** : les clients (issus de la population) se joignent au système avec un taux moyen d'arrivée.
- **Le service** : le service peut être assuré par un ou plusieurs serveurs. Le temps qui s'écoule entre le début et la fin de service d'un client est dénoté : le temps de service suivant une distribution de probabilité. Donc le taux de service  $\mu$  est une autre caractéristique du système.
- **La stratégie de service** : la stratégie de service réfère à l'ordre selon laquelle les clients sont servis : premier arrivé premier servi (FIFO), au hasard, selon des priorités.

### 5.2.3.2 La notation de Kendall

La notation de Kendall est généralement utilisée pour décrire un système utilisant une file d'attente simple. En général, pour étudier l'impact de différents choix de conception sur la performance d'une file d'attente, il faut construire un modèle de simulation. On peut aussi utiliser un modèle simplifié pour lequel les métriques s'expriment par des équations analytiques [40]. Cette notation peut se résumer par une suite de symboles A/B/C/K/N/D, Où :

A : représente la loi de probabilité du processus d'arrivée (M : markovien).

B : représente le processus de service (M : markovien).

C : pour sa part, représente le nombre de serveurs. (1 dans le cas d'une voie).

K : représente la capacité du système (file + serveurs).

N : représente la taille de la population des clients (habituellement infinie).

D : représente quant à elle la discipline de service (par défaut, FIFO, mais aussi RANDOM ou PRIORITY .).

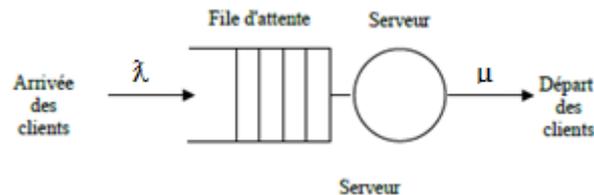


FIGURE 5.3 – schéma d'une file d'attente simple.

### 5.2.3.3 La loi de Little

La loi de Little est une relation très générale qui s'applique à une grande classe de systèmes. Elle ne concerne que le régime permanent du système. Aucune hypothèse sur les variables aléatoires qui caractérisent le système (temps d'inter arrivés, temps de service,...) n'est nécessaire. La seule condition d'application de la loi de Little est que le système soit stable [41].

- **Théorème :** (Formule de Little) le nombre moyen de clients  $L$ , le temps moyen passé dans le système (temps de séjour)  $W$  et le débit moyen d'un système stable en régime permanent se relient de la façon suivante :

$$L = W \times \lambda \quad (5.1)$$

- **Définition de la stabilité** : un système est dit stable si et seulement si la fraction du taux d'arrivée par le taux de service est inférieur à 1, c'est-à-dire :  $\lambda/\mu < 1$ .
- **Remarque** : la loi de Little s'applique à tous les modèles de file d'attente que nous pouvons rencontrer en pratique (pas seulement à la file M/M/1).

#### 5.2.3.4 Files d'attente markoviennes

Les files d'attentes markoviennes sont celles pour lesquelles les inter-arrivées et les durées de service sont exponentielles. Leur notation de Kendall sera de la forme M/M/... (M comme markovien...). Autrement dit, les inter-arrivées ont une distribution exponentielle de paramètre  $\lambda$  et le temps de service d'un client au sein d'un serveur est une variable aléatoire ayant une distribution exponentielle de taux  $\mu$ .

- La file M/M/1

Cette file est caractérisée par une arrivée poissonnienne de taux  $\lambda$  et une durée de service exponentielle de taux  $\mu$ . C'est une file d'attente à un seul serveur, et la capacité de la file est infinie. Nous définissons ci-dessous quelques paramètres de performance :

Taux d'utilisation du serveur U

Par définition, le taux d'utilisation est la probabilité pour que le serveur de la file soit occupé.  $\rho = \lambda/\mu$

Nombre moyen de clients L

$$L = \rho / (1 - \rho) \quad (5.2)$$

Temps moyen de séjour W

Ce paramètre est obtenu en utilisant la loi de Little :

$$W = L/\lambda = 1/\mu * (1 - \rho) \quad (5.3)$$

On en déduit le temps moyen passé dans la file d'attente  $W_q$  :

$$W_q = \rho/\mu * (1 - \rho) \quad (5.4)$$

Nombre moyen de clients dans la file d'attente  $L_q$  :

$$L_q = \lambda * W_q = \rho^2 / (1 - \rho). \quad (5.5)$$

- La file M/M/1/K

File d'attente à un seul serveur, et la capacité est limitée à K (clients + serveur), donc K-1 clients dans la file d'attente. Si un client arrive alors qu'il y a déjà K clients présents dans le système, il sera perdu.

La probabilité qu'un client soit perdu est donnée comme suit :

$$P(n) = \rho^n * (1 - \rho) / (1 - \rho^{n+1}) \quad (5.6)$$

Puisque  $\rho = \lambda/\mu$ , on a bien  $d_e = d_s = d$ , où d est le débit moyen de la file (d'entrée ou desortie). En effet, dans le cas d'une file à capacité limitée, le taux d'utilisation n'est plus égal à  $\rho$ . Le taux d'utilisation est toujours égal au rapport du débit moyen d'entrée sur le taux moyende service (loi de Little) :  $U = d/\mu$ . Mais ici d n'est plus égal à  $\lambda$  D'où :

$$d = \lambda * (1 - \rho^K) / (1 - \rho^{K+1}) \quad (5.7)$$

Taux d'utilisation du serveur U(K)

$$U(K) = \rho * (1 - \rho^K) / (1 - \rho^{K+1}) \quad (5.8)$$

Nombre moyen de clients L

$$L = (\rho / (1 - \rho)) * (1 - (K + 1)\rho^K + K\rho^{K+1}) / (1 - \rho^{K+1}) \quad (5.9)$$

Temps moyen de séjour W

Nous considérons ici le temps moyen de séjour d'un client effectivement admis dans la file d'attente. Cette quantité peut être obtenue par application de la loi de Little.

$$W = L/d \quad (5.10)$$

- La file M/M/C

File d'attente à une capacité infinie et C serveurs identiques avec un temps de service exponentiel de paramètre  $\mu$  pour chacun d'eux. La file est stable si  $\lambda < C * \mu$ . Cela signifie que le nombre moyen de clients qui arrivent à la file par unité de temps doit être inférieur au nombre moyen de clients que les serveurs de la file sont capables de traiter par unité de temps.

### Le débit moyen

Le débit moyen de sortie est égal au débit moyen d'entrée, donc :  $d = \lambda$ .

Temps moyen de séjour W

$$W = \rho^C * \pi_0 / (\mu(C-1)! * (C-\rho)^2) + 1/\mu \quad (5.11)$$

Tel que :  $\pi_0 = 1 / (\sum_{n=0}^{C-1} \rho^n / n! + (\rho^C / ((C-1)! * (C-\rho))))$

### Nombre moyen de clients L

Le nombre moyen de clients s'obtient alors par application de la loi de Little à l'ensemble de la file :

$$L = W \times d = W \times \lambda = \pi_0 * \rho^{C+1} / ((C-1)! * (C-\rho)^2) + \rho \quad (5.12)$$

- La file M/M/ $\infty$

Nous considérons un système composé d'un nombre illimité de serveurs identiques et indépendants les uns des autres. Dès qu'un client arrive, il rentre donc instantanément en service. Dans cette file particulière, il n'y a donc pas d'attente.

Le débit d

$$D = \lambda$$

Nombre moyen de clients L

$$L = \rho \quad (5.13)$$

Temps moyen de séjour W

$$W = L/d = \rho/\lambda = 1/\mu \quad (5.14)$$

### 5.2.4 Les système d'attente avec priorité

Les programmes dans un ordinateur ou les paquets dans un réseau informatique peuvent ne pas être traités de la même façon : quelques-uns peuvent recevoir un traitement préférentiel. Dans un tel système les clients sont divisés en classes, allant de 1 à R s'il existe R classes de clients différentes où les clients de la classe avec un numéro faible appartiennent à la classe de priorité haute. Les systèmes d'attente dans lesquels les clients reçoivent des traitements préférentiels sont dit : systèmes d'attente prioritaires.

- Priorité relative

Un tel système peut être considéré comme un système d'attente prenant en considération la panne qu'après que le client en service ait terminé son service. La période de réparation est considérée comme étant la période de service du client prioritaire.

- Système  $M_2/M_2/1$  avec priorité relative

Ce système a été étudié par plusieurs chercheurs, parmi eux Rupert et al [50]. Dans un tel

système, nous considérons deux classes de clients :

**classe1** : clients non prioritaires

**classe2** : clients prioritaires

Les deux types des clients arrivent indépendamment les uns des autres suivant un processus poissonnien avec des taux :  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  respectivement. Les services des clients prioritaires et non prioritaires se font suivant la loi exponentielle de taux  $\mu_1$  et  $\mu_2$  respectivement. Pour les systèmes M2/M2/1/ $\infty$ , si nous considérons l'attente avec priorité relative, les clients arrivent selon un processus de poisson, les taux des arrivées de la première classe est  $\lambda_1$  (respectivement  $\lambda_2$  pour la deuxième classe). Les services des clients prioritaires et non prioritaires se fait suivant une loi exponentielle de taux :  $\mu_1$  et  $\mu_2$  respectivement. Notons  $P_{n,m,r}$  la probabilité d'avoir  $n$  clients non prioritaires et  $m$  clients prioritaires au temps  $t$  et  $r$  indique le client en service. Alors  $P_{n,m,r}$  est donné par le système d'équation suivant :

$$\begin{aligned}
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2) * P_{0,0} + \mu_1 * P_{1,0,1} + \mu_2 * P_{0,1,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) * P_{1,0,1} + \lambda_1 * P_{0,0} + \mu_1 * P_{2,0,1} + \mu_2 * P_{1,1,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) * P_{0,1,2} + \lambda_2 * P_{0,0} + \mu_1 * P_{1,1,1} + \mu_2 * P_{0,2,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) * P_{m,0,1} + \lambda_1 * P_{m-1,0,1} + \mu_1 * P_{m+1,0,1} + \mu_2 * P_{m,1,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) * P_{0,n,2} + \lambda_2 * P_{0,n-1,2} + \mu_1 * P_{1,n,1} + \mu_2 * P_{0,n+1,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_2) * P_{1,n,1} + \lambda_2 * P_{1,n-1,1} + \mu_1 * P_{2,n,1} + \mu_2 * P_{1,n+1,2}, \\
 0 &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \mu_1) * P_{m,n,1} + \lambda_1 * P_{m-1,n,1} + \lambda_2 * P_{m,n-1,1} + \mu_1 * P_{m+1,n,1} + \mu_2 * \\
 &P_{m,n+1,2}; m > 1, n > 0, \\
 0 &= -(\lambda + \mu) * P_{m,n,2} + \lambda_1 * P_{m,n-1,2}; m > 0, n > 1
 \end{aligned}$$

(5.15)

### 5.2.5 Les réseaux de file d'attente RFA

Un réseau de files d'attente est un ensemble de files simples (stations) interconnectées. Il existe différents types de réseaux de files d'attentes, à savoir : les réseaux de FA ouverts, les

réseaux de FA fermés, les réseaux de FA multi classes, les réseaux de FA mixtes [41, 43].

### 5.2.5.1 Les différents types de RFA

Nous distinguons quatre types de RFA, à savoir :

- **Les réseaux ouverts** : un réseau est ouvert si tout client présent ou entrant dans le système peut le quitter.
- **Les réseaux fermés** : un réseau est fermé si les clients ne peuvent le quitter. Dans un tel réseau, le nombre de client est généralement fixe et ces derniers sont présents dans le système dès le début de son évolution.
- **Les réseaux mixtes** : un réseau est mixte s'il est ouvert pour certains clients et fermé pour d'autres.
- **Les réseaux mono ou multi-classes** : les réseaux de files d'attente peuvent être parcourus par une ou différentes classes de clients.

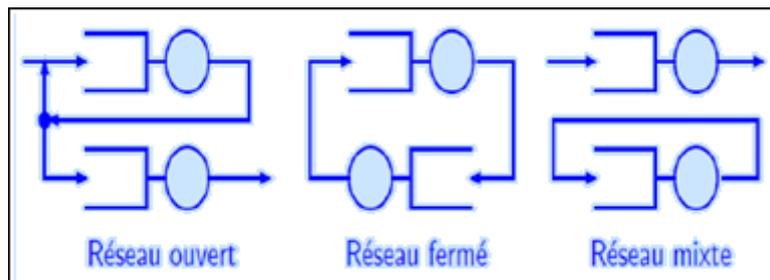


FIGURE 5.4 – Trois exemples de RFA (ouvert, fermé et mixte)

### 5.2.5.2 Réseaux de files d'attente à forme produit

Comme nous l'avons dit, un réseau de files d'attente est un ensemble de files d'attente interconnectées. Rappelons aussi que l'on classe les réseaux de files d'attente en deux catégories :

- Les réseaux de files d'attente mono classe, dans lesquels circule une seule classe de clients.
- Les réseaux de files d'attente multi classes, dans lesquels circulent plusieurs classes de clients.

Ces différentes classes pouvant se distinguer par des comportements différents au niveau de chaque station, tant au niveau du service que de l'ordonnancement de l'attente.

#### Définition d'un RFA à forme produit :

Nous considérons un réseau de files d'attente parcouru par différentes classes de clients. Les clients ne changent pas de classe lors de leur cheminement dans le réseau. Ce réseau possède les caractéristiques suivantes :

- Un seul serveur pour chaque station.
- Une capacité de stockage illimitée pour toutes les stations.
- Des routages probabilistes pour chaque classe de clients.

### Les réseaux de Jackson :

Un réseau de Jackson est un réseau de  $K$  files d'attente  $(Q_1, Q_2, \dots, Q_k)$  satisfaisant les quatre propriétés suivantes :

- (a) Les durées de service dans chaque file sont indépendantes et exponentielles de moyenne  $1/\mu_1, 1/\mu_2, \dots, 1/\mu_k$ .
- (b) Les arrivées des clients de l'extérieur pour chaque file sont indépendantes et distribuées selon des processus de poisson avec des taux  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ . En fait, le réseau possède une source 0 à partir de laquelle des clients entrent dans le réseau par la file  $j$  avec une probabilité  $P_{0j}$ .
- (c) Le réseau utilise un routage aléatoire. Ainsi, les clients sont acheminés dans le réseau suivant des probabilités de routage  $P_{ij}$  (probabilité de sortie de la file  $i$ , d'entrer à la file  $j$ ).

$$\sum_{j=0}^K P_{ij} = 1, i = 1, \dots, K \quad (5.16)$$

- (d) Si le réseau est ouvert, il existe une station par laquelle les clients quittent le système. Le flux total des clients arrivant dans le système est sous forme d'un processus de poisson de paramètre  $\lambda$ .

La condition de stabilité du réseau est la suivante :  $\rho_i < 1$ , pour  $i = 1, \dots, K$ .

### 5.2.6 Présentation du modèle d'intersection à simuler

Notre stratégie de contrôle opère sur de multiples intersections et prend en considération plusieurs facteurs. Ceci dit, notre étude analytique va se faire au niveau de l'intersection centrale du réseau d'intersections. Cela se justifie par le fait que chaque intersection subie le même comportement. Nous modélisons ci-dessous, à l'aide des files d'attente, une intersection à deux voies par direction de la ville de Bejaia (l'intersection de NACERIA). Pour cela, nous sommes inspirés de l'étude faite au niveau de celle-ci en l'an 2012[43] et nous avons continué l'étude en s'appuyant sur leur analyse de données (données réelles fournies par la direction de l'urbanisme et du transport) tout en appliquant notre propre approche. Nous allons d'ailleurs procéder à une comparaison des résultats obtenus dans la partie suivante (la partie simulation).

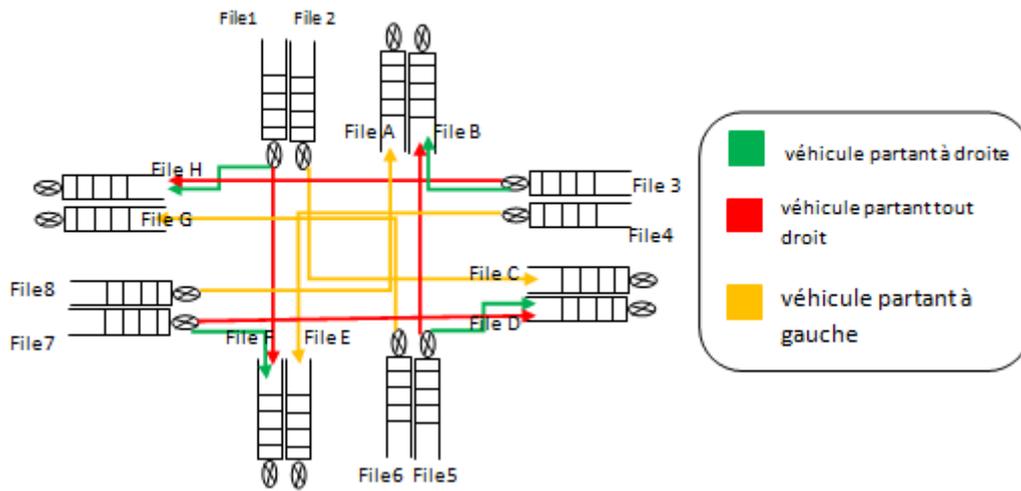


FIGURE 5.5 – Modélisation d’une seule intersection avec les RFA.

Par la suite, grâce aux réseaux de files d’attente à forme produit et aux réseaux de Jackson, nous généralisons cette étude qui peut s’étendre sur un réseau bien plus complexe que le réseau initial. Le modèle général proposé dans notre approche comprend cinq intersections dotées des feux de signalisation. Il est représenté par la figure ci-dessous (voir la figure 5.6).

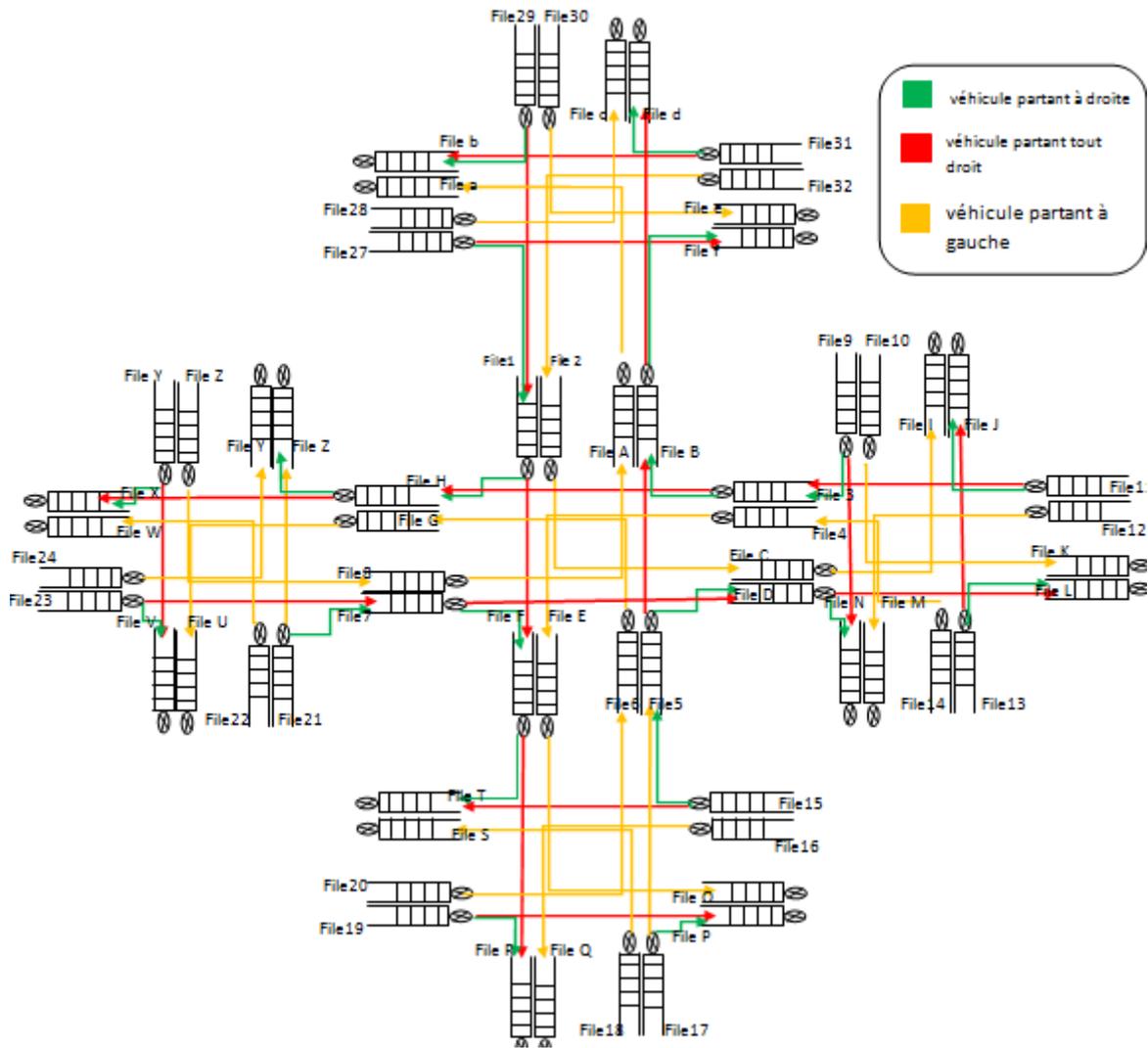


FIGURE 5.6 – Le modèle général d'un réseau de files d'attente constitué de cinq intersections.

### 5.2.7 Etude analytique

Dans notre étude analytique nous avons traité les données reçues soit, à partir des capteurs, soit à partir des contrôleurs de intersections voisines. Grace aux tests de Kolmogorov-Smirnov [43], nous avons pu démontrer que notre système est stable.

Nos clients sont divisés en deux classes, les véhicules prioritaires et les véhicules non prioritaires. Lors de la détection d'un véhicule prioritaire dans une file, nous calculons le temps du feu vert pour cette dernière afin de lui donner l'accès directe. Dans le cas où les capteurs détectent des véhicules prioritaires dans plusieurs files, nous procéderons à l'application de la politique First In First Out (FIFO).

## 5.3 Simulation

La simulation possède plusieurs avantages. En effet, un simulateur est capable de modéliser des situations réalistes et parfois complexes, tout en nous donnant la possibilité d'agir en implantant certains éléments (algorithmes, détecteurs, etc.).

### 5.3.1 Généralité sur la simulation

La simulation est une technique largement utilisée pour l'évaluation des performances. Elle traduit d'une manière plus réaliste le comportement du système à évaluer. En d'autres termes, la simulation procède à imiter l'évolution d'un système dans le temps et calcule ensuite ses caractéristiques. La simulation est souvent sollicitée lorsque :

- L'expérience sur le système est impossible ou dangereuse (soleil,...).
- Le système évolue rapidement de telle sorte qu'on ne peut pas l'observer avec précision.
- Le système évolue très lentement.
- L'expérience est coûteuse financièrement.
- Le système est en place de conception.
- On veut vérifier des résultats analytiques.

### 5.3.2 Cycles de modélisation et de simulation

Il y a cinq phases dans le cycle de modélisation et de simulation. Elles sont représentées comme suit :

- **Définition du problème** : cette étape consiste principalement à identifier et à analyser le problème, en déterminant ses composantes et les frontières entre le système et son environnement.
- **Conception du modèle** : cette phase consiste à extraire un modèle aussi fidèle que possible du système réel dans le but d'expliquer et de prédire certains aspects de son comportement.
- **Exécution de la simulation** : le concepteur doit pouvoir mettre à l'épreuve le modèle en agissant sur les paramètres qui le configurent. Il s'agit d'effectuer plusieurs exécutions et de recueillir les résultats obtenus.
- **Analyse des résultats** : une fois les résultats obtenus, le concepteur passe à l'analyse et à l'interprétation de ces résultats afin de donner des recommandations et des propositions.
- **Prendre une décision** : cette étape consiste à évaluer les perspectives d'exploitation du modèle pour d'autres préoccupations.

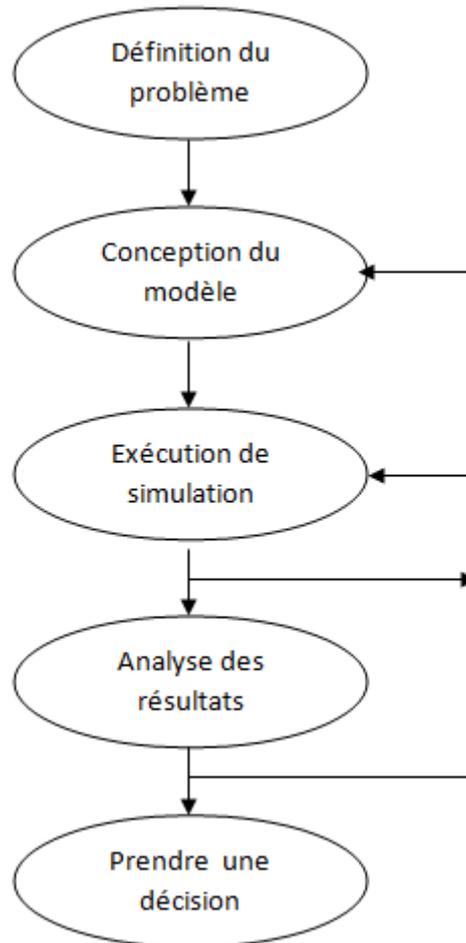


FIGURE 5.7 – Cycle de modélisation et de simulation .

### 5.3.3 Simulation par événement discrets

La simulation par événement discrets désigne la modélisation d'un système réel tel qu'il évolue dans le temps, par une représentation dans laquelle les grandeurs caractérisent le système (variables) qui ne change qu'en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps[45]. Ces points sont les instants où se passent les événements. Pour une station de file d'attente, les événements généralement considérés sont :

- L'arrivée d'un client à la station.
- La prise en charge d'un client par le serveur.
- La sortie du client de la station.

### 5.3.4 Outil de simulation

Afin de pouvoir simuler le phénomène de la congestion urbaine, notamment, au niveau des intersections dotées de feux de signalisation, nous avons opté pour le logiciel Matlab.

Matlab (MATtrix LABoratory) est un logiciel de calcul numérique produit par Math Works. Il est disponible sur plusieurs plate formes. L'intérêt de Matlab tient, d'une part, à sa simplicité d'utilisation : pas de compilation, pas de déclaration de variables et, d'autre part, à sa richesse fonctionnelle : arithmétique matriciel et nombreuses fonctions de haut niveau dans de nombreux domaines (analyse numérique, graphique, ...)[46].

### 5.3.5 Simulation d'une file d'attente

- L'arrivée d'un client dans la file : les clients arrivent dans des intervalles de temps régulier.
- fin de service : un client quitte le système après avoir été servi. Un client est servi si :

Il occupe la tête de la file d'attente et le serveur est libre.

Il est le premier arrivé au système.

### 5.3.6 Test d'hypothèse

Un test d'hypothèse est un mécanisme (ensemble de règle) qui permet de trancher entre deux hypothèses antagonistes en vu d'un résultat d'un échantillon. Soient  $H_0$  et  $H_1$  les deux hypothèses en question, dont une seule est vraie. La décision aboutira au choix d'une des deux. Il existe plusieurs tests d'ajustement qui permettent de vérifier l'appartenance d'un échantillon à une loi spécifique.

- Test Kolmogorov-Smirnov

Il s'agit d'un test d'ajustement à une distribution entièrement spécifiée, de fonction de répartition  $F(x)$ . L'essence de ce test est la comparaison de la fonction de répartition empirique de l'échantillon, noté  $F_n(x)$ , à la fonction de répartition théorique, notée  $F(x)$ , de la population. Nous chercherons donc à déterminer l'écart maximal existant. Soit  $D$  cet écart :  $D = \sup_{x \in \mathbb{R}} |F_n(x) - F(x)|$ .

- Règle de décision

Nous fixons un seuil de signification  $\alpha$  et nous comparons  $D$  à des valeurs critiques particulières que nous notons  $D_n$  ( $n$  : la taille de l'échantillon), obtenue à partir de la table de Kolmogorov-Smirnov. La décision sera :

Nous acceptons  $H_0$  si  $D > D_n$

Nous rejetons  $H_0$  sinon.

Les résultats obtenus en utilisant l'outil R pour chaque destination de chaque voie sont :

destination	Sidi Ahmed	Amriw	Aures	Wilaya
lambda	0.29	0.36	0.12	0.36
File de droite	0.16	0.31	0.06	0.24
File de gauche	0.13	0.05	0.06	0.12

TABLE 5.1 – Processus d'arrivée des véhicules.

### 5.3.7 Interprétation des résultats de simulation

Dans le but d'évaluer les performances de notre système, nous avons élaboré un modèle de simulation qui peut reproduire le comportement du système correspondant, toutefois, sans prendre en considération tous les facteurs (système de simulation simplifié).

Dans cette section, nous comparons les résultats de simulation (la nôtre et celle de l'an 2012 [43]). Nous utilisons MATLAB afin de simuler le comportement des véhicules. Les paramètres de simulation d'intérêt principaux sont le nombre moyen de véhicules dans la file et le temps d'attente moyen dans la file. Ces mesures sont choisies car elles indiquent les schémas de flux de trafic et leur effet sur la diminution de la congestion du trafic. Dans notre simulation, nous avons rajouté le nombre total de véhicules évacués dans le système. Ce paramètre nous renseigne de façon approximative sur l'efficacité du contrôleur.

#### 5.3.7.1 Résultats de simulation

Après l'exécution du programme de simulation, pour un temps de simulation :  $T_{\text{simulation}} = 1000$ secondes, avec un taux de service :  $\mu = 0,4$ . Nous avons obtenu les résultats suivants (Nous précisons que c'est également nous qui avons simulé le modèle présenté dans [43] à partir de leurs paramètres d'entrée ).

Paramètre/ File	File1	File2	File3	File4
Nombre moyen de clients dans la file	80.3089	96.9892	16.2832	96.6434
Temps moyen d'attente dans la file (s)	200.1787	239.4345	37.5618	239.7357

TABLE 5.2 – Résultat de simulation de la solution de l'an 2012 [43]

Paramètre/ File	File1	File2	File3	File4	File5	File6	File7	File8
Nombre moyen de clients dans la file	50.3210	4.0698	28.1889	31.5899	5.8267	3.1224	90.0718	1.0000
Temps moyen d'attente dans la file (s)	123.7915	8.0263	68.4555	75.6933	11.9945	5.7532	220.1276	0

TABLE 5.3 – Résultats de la simulation de notre modèle

Le nombre moyen de clients évacués durant le temps de simulation est égale à 334.

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les mesures de performances évaluées sont améliorées d'une manière significative, avec notre approche. En effet, que ce soit en termes du nombre moyen de véhicules en attente dans les files ou même en termes du temps moyen d'attente des véhicules dans les files, nos résultats sont nettement plus réduits que ceux de la solution proposée l'an 2012[43]. Nous pouvons donc en déduire que les files de notre approche sont les moins surchargées, ce qui montre que la gestion du trafic routier en adoptant notre solution peut s'adapter à des chemins congestionnés afin de fluidifier la congestion urbaine.

Le temps d'attente du modèle proposé dans [43] est bien plus grand, ce résultat montre clairement que notre stratégie de contrôle est capable de gérer différents véhicules d'une manière équitable. Cette amélioration est tout à fait prévisible dans la mesure où le contrôle et la gestion des feux se fait d'une manière dynamique (prise en compte de 2/4 phases). D'autant plus que le nombre de voies joue un rôle plus qu'essentiel (notre approche gère le trafic sur huit files par intersection, alors que la solution de l'an 2012 gère seulement quatre files par intersection).

## 5.4 Conclusion

La technologie des réseaux de capteurs s'est beaucoup développée durant ces dernières années et son impact sur les réseaux routiers urbains peut être d'une grande importance. Dans un premier temps, nous avons modélisé une seule intersection de la ville de Bejaia (intersection de NACERIA) avec un réseau de files d'attente. Par la suite, grâce aux réseaux de Jackson ainsi qu'aux RFA à forme produit, nous avons généralisé l'étude d'une seule intersection pour modéliser un réseau d'intersections (cinq intersections adjacentes).

Finalement, nous avons prouvé l'efficacité de la gestion du trafic routier urbain basée sur notre stratégie de contrôle dynamique des feux de signalisation intégrant les STI et les RCSFs.

En effet, nous avons simulé un modèle d'intersections et les résultats obtenus parlent d'eux même. Après avoir comparé les résultats des simulations de notre approche et celle proposée l'an 2012, il semble évident que nous avons obtenu de meilleures performances, que ce soit en terme de temps d'attente ou même du nombre de véhicules.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

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 est fait grâce à une démarche s'appuyant sur des capteurs sans fil localisés dans les équipements de signalisation routière auxquels adjoint les systèmes de transport intelligents.

Au fil de ce document, nous avons tout d'abord passé en revue les principaux aspects des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons ainsi montré que ces équipements particuliers possèdent l'avantage d'être petits, à bas prix et d'une logique naturelle distribuée. Par la suite, nous nous sommes recentrés sur la présentation des systèmes de transport intelligents, en faisant un rapide parcours sur cette technologie existante et les principes de cette tendance qui évolue quotidiennement.

L'étude bibliographique réalisée a montré que les méthodes existantes pour la régulation du trafic au niveau des intersections sont peu efficaces. Une séquence de passage plus efficace sera donc nécessaire afin d'améliorer la situation du trafic routier urbain. La partie qui suit l'étude bibliographique porte sur le problème de la congestion urbaine et sur l'optimisation des feux de signalisation à l'aide de l'intégration de la communication route-à-infrastructure et la communication infrastructure-à-infrastructure dans de multiples intersections. Nous y trouvons l'ampleur du problème de la congestion ainsi que les principales notions relatives au trafic routier.

Notre réflexion nous a amené à proposer un système de contrôle qui décide de manière explicite de la séquence de passage des véhicules. Ainsi, chaque véhicule est traité et est informé de son autorisation de traverser l'intersection et ce grâce aux feux de signalisation. Les avantages de ce système sont évidents. Il maximise l'utilisation des ressources de l'intersection en

organisant dynamiquement les séquences de passage.

L'approche que nous avons proposée dans ce mémoire est ensuite présentée. Nous avons introduit une nouvelle stratégie pour la régulation du trafic routier au niveau de multiples intersections. Cette nouvelle stratégie est basée sur les technologies de la communication sans-fil, nous parlons évidemment des RCSFs. L'exploitation des informations récoltés grâce à ceux-ci, nous ont permis de formuler mathématiquement notre problème dans le but de proposer un algorithme efficace pour évacuer le maximum de véhicules présents dans les files d'attente en un temps optimal. De plus, notre stratégie de contrôle prend en compte divers facteurs.

Le modèle général proposé comprend cinq intersections dotées des feux de signalisation. Quant à l'étude analytique, elle s'est faite au niveau de l'intersection se trouvant au centre du réseau d'intersections. Par la suite, grâce aux réseaux de files d'attente à forme produit, nous avons pu généraliser cette étude qui peut s'étendre sur un réseau bien plus complexe que le réseau initial.

Afin d'appuyer notre approche, nous nous sommes proposé de faire une comparaison des résultats de la simulation effectuée en l'an 2012 et notre propre simulation sur le trafic routier d'une même intersection de la ville de Bejaïa (l'intersection de NACERIA). D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les mesures de performances évaluées sont améliorées d'une manière significative avec notre approche.

Notre travail a permis d'explorer un nouveau domaine de recherche, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique : sur le plan théorique, nous avons proposé un nouveau modèle de régulation du trafic routier prenant en considération plusieurs facteurs. Du point de vue pratique, nous avons proposé une amélioration en termes de temps d'attente et du nombre de véhicules dans les files d'attente par rapport aux travaux déjà effectués.

Toutefois, les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ouvrent de nouvelles perspectives telles que :

L'élargissement de l'étude sur la congestion urbaine. En effet, il serait intéressant d'envisager l'intégration du facteur humain dans ce genre d'études.

Faute de temps, nous n'avons malheureusement pas pris tous les facteurs de notre approche lors de la simulation, il serait donc judicieux d'y parvenir, cela ne serait que plus avantageux.

Ceci, sans oublier les perspectives que laissent entrevoir les réseaux de capteurs sans fil qui sont nombreux. D'autant plus que l'interaction possible de ceux-ci avec les réseaux véhiculaires décuple les possibilités déjà existantes : il serait donc fascinant d'étudier les limites et nombreux aspects de cette catégorie de modèles particuliers.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. N. SALEM , "Conception d'un protocole MAC pour la communication entre un réseau de capteur sans fil et un satellite LEO", Thèse doctora, université A. Mira de Bejaia , mai 2008.
- [2] S. Faye, "'Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil Sébastien Faye", Mars 2012.
- [3] M. AISSANI, "'Optimisation du routeréseau de capteurs applications temps,Thèse en cotutelle", mars 2011.
- [4] [www.meas-spec.fr/sensor-types/traffic-sensors.html](http://www.meas-spec.fr/sensor-types/traffic-sensors.html).
- [5] M. DIOURI, "'Réseaux de capteurs sans fil : routage et sécurité", Thèse d'ingénieur, 2010.
- [6] N. Nadim, "'Conception et modélisation d'un émulateur de réseaux de capteurs sans fils", Doctora de l'université de toulouse, 2012.
- [7] "Sciences de l'ingénieur, Les capteurs de position", NB, 2010.
- [8] K. BEYDOUN, "'conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseauxde capteurs", 2009.
- [9] A. MELKI, "Système d'aide à la régulation et évaluation des transport multimodaux integrant les cybercars", Novembre 2008.
- [10] G. Chalhoub, "'Routage et MAC dans les réseaux de capteurs sans fil"', novembre 2010.
- [11] "Systèmes de transport intelligents Une tentative de synthèse".
- [12] A. BOUDJAADAR, "'Plateforme basée agents pour l'aide à la conception et la simulation des réseaux de Capteurs Sans Fil", 2010.
- [13] H. Karl and A. Willig, "Protocols and architectures for wireless sensor networks", Wiley, 2005.

- [14] S. Sentilles, "Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau", 2009.
- [15] "Adaptation méta heuristique efficace pour le routage dans les réseaux de capteurs sans fil".
- [16] F. Doetzer, F. Kohlmayer, T. Kosch and M. Strassberger, "Secure communication for intersection assistance". In Proc. of the 2nd Int. Workshop on Intelligent Transportation, Hamburg, Germany, March 2005.
- [17] [http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com\\_contenttask=view&Itemid=39&lang=fr](http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com_contenttask=view&Itemid=39&lang=fr).
- [18] A. Friedrich, T. Ma, F. Ramond et M. Rohani , "Compléments à la présentation", PWP sur les ITS, 2005.
- [19] <http://www.rapibus.sto.ca/index.php?id=53>.
- [20] <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Systemes-de-transport-intelligents,12596.html>.
- [21] OECD SCIENCE, "Technology and industry" , OUTLOOK © OECD, 2012.
- [22] Province du Nouveau-Brunswick Case postale 6000 Fredericton (N.-B.) E3B 5H1, Plan stratégique 2008-2018 du Nouveau-Brunswick sur les systèmes de transport intelligents (STI).
- [23] [http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com\\_contenttask=view&Itemid=46&lang=fr](http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com_contenttask=view&Itemid=46&lang=fr).
- [24] [http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com\\_contenttask=view&Itemid=42&lang=fr](http://road-network-operations.piarc.org/index.php?option=com_contenttask=view&Itemid=42&lang=fr).
- [25] BROCHURE Direction Générale des Infrastructures, "Des Transports et de la Mer, Les systèmes de transport intelligents (STI)", France, Juin 2011.
- [26] <http://www.transport-intelligent.net/acteurs-politiques-sti/politiques-sti>.
- [27] <http://www.transcore.com/pdf/Systemes-de-transport-intelligents.pdf> .
- [28] P. LUC et G. GIRARD, "Communication inter-véhicules et route-a-véhicule Apprentissage de la communication inter-véhicules".
- [29] C. Buisson, Jean et B. Lesort, "Comprendre le trafic routier méthodes et calculs", avril 2010.
- [30] J. ABDO, "Construire de nouvelles infrastructures routières La solution à la congestion du trafic?", par le Centre d'information sur le ciment et ses application(CIMbéton), Décembre 2011.
- [31] Centre d'études sur les réseaux, "les transports, l'urbanisme et les constructions publiques : les temps de parcours Estimation, diffusion et approche multimodale", Éditions du Certu, GAO-12-308P, Avril 2008.
- [32] Intelligent Transportation Systems, "Improved DOT Collaboration and Communication Could Enhance the Use of Technology to Manage Congestion",GAO-12-308, mars 2012.

- [33] F. YAN, "Contribution à la modélisation et à la régulation du trafic aux intersections : Intégration des communications Véhicule-Infrastructure" , Mars 2012.
- [34] A. Goel, S. Ray et N. Chandra, "Intelligent traffic light system to prioritized emergency purpose vehicles based on wireless sensor network", February 2012.
- [35] M. KAFI, Y. CHALLAL, D. DJENOURI, A. BOUABDALLAH et L. BADACHE, " A study of Wireless Sensor Network Architectures and Projects for Traffic Light Monitoring", 2012.
- [36] M. Halbwachs, "Des outils de gestion du trafic des feux de signalisation en particulier", 2000.
- [37] [http ://domotique34.com/ ?p=2987](http://domotique34.com/?p=2987).
- [38] O. A. Said et L. Iberraken, "Aménagement d'un carrefour par des feux de signalisation", Mémoire d'ingénieur, département Recherche Opérationnelle, Université A/Mira Bejaia, 1999.
- [39] "Modèle de file d'attente".
- [40] S. de Montigny et S. Le Digabel, "Introduction aux files d'attente", Ecole Polytechnique de Montréal,A 2012 (v2).
- [41] C. Chabriac, "Processus stochastique et modélisation", Université de Toulouse, 2013.
- [42] V. P. Do, "Théorie des files d'attente" , AFSF-SIE/TELECOM Nancy, 2013.
- [43] I. Alioua et A. Djouder, "Gestion de trac urbain à base de réseau de capteurs sans Fil : Cas de la ville de Béjaia", Université A. Mira de Bejaia, 2012.
- [44] L. BOUALLOUCHE et MEDJKOUNE, "Modélisation et simulation des systèmes informatiques et réseaux de télécommunications", Cours Ecole Doctorale Informatique ReSyD, Département Informatique, Université de Bejaïa, 2009.
- [45] [http ://mplogic.com/gfa/index.html](http://mplogic.com/gfa/index.html).
- [46] A. Casadevall, "Introduction à MATLAB", université paris-Dauphine, mars 2004.
- [47] [http ://q-matic.com/fr-BE/be/Nos-prestations/File-dattente-lineaire/](http://q-matic.com/fr-BE/be/Nos-prestations/File-dattente-lineaire/).
- [48] H. Karvonen, "Different aspects of trust in ubiquitous intelligent transportation systems", 2010.
- [49] [http ://www.lefigaro.fr/conso/2013/01/02/05007-20130102ARTFIG00455-une-appli-mobile-pour-eviter-les-longues-files-d-attente.php](http://www.lefigaro.fr/conso/2013/01/02/05007-20130102ARTFIG00455-une-appli-mobile-pour-eviter-les-longues-files-d-attente.php).
- [50] R. Stanica, "Contrôle de Congestion dans les Réseaux Véhiculaires Congestion Control in Vehicular Ad-Hoc Networks", Novembre 2011.
- [51] S. Faye , C. Chaudet et Is, " Demeure.A Distributed algorithm for multiple intersections adaptive traffic lights control using a wireless sensor networks".
- [52] B. Zhou, J. Cao, X. Zeng, and H. Wu, "Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system", In Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), pages 1-5.

- [53] F. Zou, B. Yang, and Y. Cao, "Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network", In 9<sup>th</sup> International Conference on Electronic Measurement Instruments (ICEMI 2009), pages 1-1040, 2009.

## Loi exponentielle et processus de Poisson

### Loi exponentielle

La loi exponentielle est sans aucun doute, la variable aléatoire la plus utilisée dans la théorie des files d'attente. Elle est, par ailleurs, un préambule nécessaire à l'analyse des chaînes de Markov. Nous donnons ici les définitions et propriétés principales de la loi exponentielle. Toutes les preuves des propriétés sont ici omises et peuvent être trouvées dans [?].

#### Définition

La loi exponentielle de paramètre  $\lambda$  est une variable aléatoire continue  $T$  à valeurs positives définie par sa fonction densité de probabilité :

**La fonction de répartition de la loi exponentielle est :**

$$F_T(t) = \begin{cases} \lambda \exp^{-\lambda t}, & \text{pour } t \geq 0; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5.17)$$

### Processus de Poisson

Le processus de Poisson est, au même titre que la loi exponentielle pour les variables aléatoires, le processus stochastique le plus utilisé dans la théorie des files d'attente. Il modélisera généralement le processus d'arrivée des clients dans un système. On parlera alors d'arrivées Poissonniennes (4.3). Plus de détails sur le processus de Poisson et sur les processus stochastiques en général peuvent être trouvés dans [4].

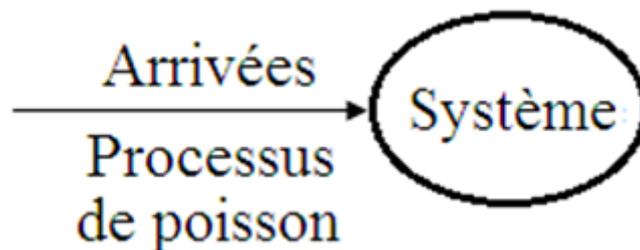


FIGURE 5.8 – Arrivées Poissonniennes

## Probabilités de routage :

L'analyse des flux directionnels enregistrés lors de la campagne de recensement au niveau des intersections du chemin menant de Tobal vers les Aurès, nous donne les probabilités de routage représentées dans le tableau :

<b>destination</b>	<b>Sidi Ahmed</b>	<b>Amriw</b>	<b>Aures</b>	<b>Wilaya</b>
Tout droit	0.37	0.40	0.14	0.65
à droite	0.18	0.47	0.40	0.006
à gauche	0.45	0.13	0.46	0.34

TABLE 5.4 – probabilité de routage

## Processus d'arrivée des véhicules

L'ajustement des lois des arrivées par des lois théoriques s'est fait grâce au logiciel statistique R. Ce logiciel a permis de tester des ajustements par différentes lois discrètes ou continues. Il affiche à chaque essai les valeurs de Kolmogorov-Smirnov calculées, afin de pouvoir les comparer aux valeurs théoriques et de décider ensuite de rejeter ou d'accepter l'hypothèse  $H_0 A_i \rightarrow \text{Poisson}(\lambda_i)$  contre  $H_1 A_i \rightarrow \text{Poisson}(\lambda_i)$ . Le risque de erreur lors de la prise de décision est fixé à un seuil de confiance de 5

## Oranigramme de simulation

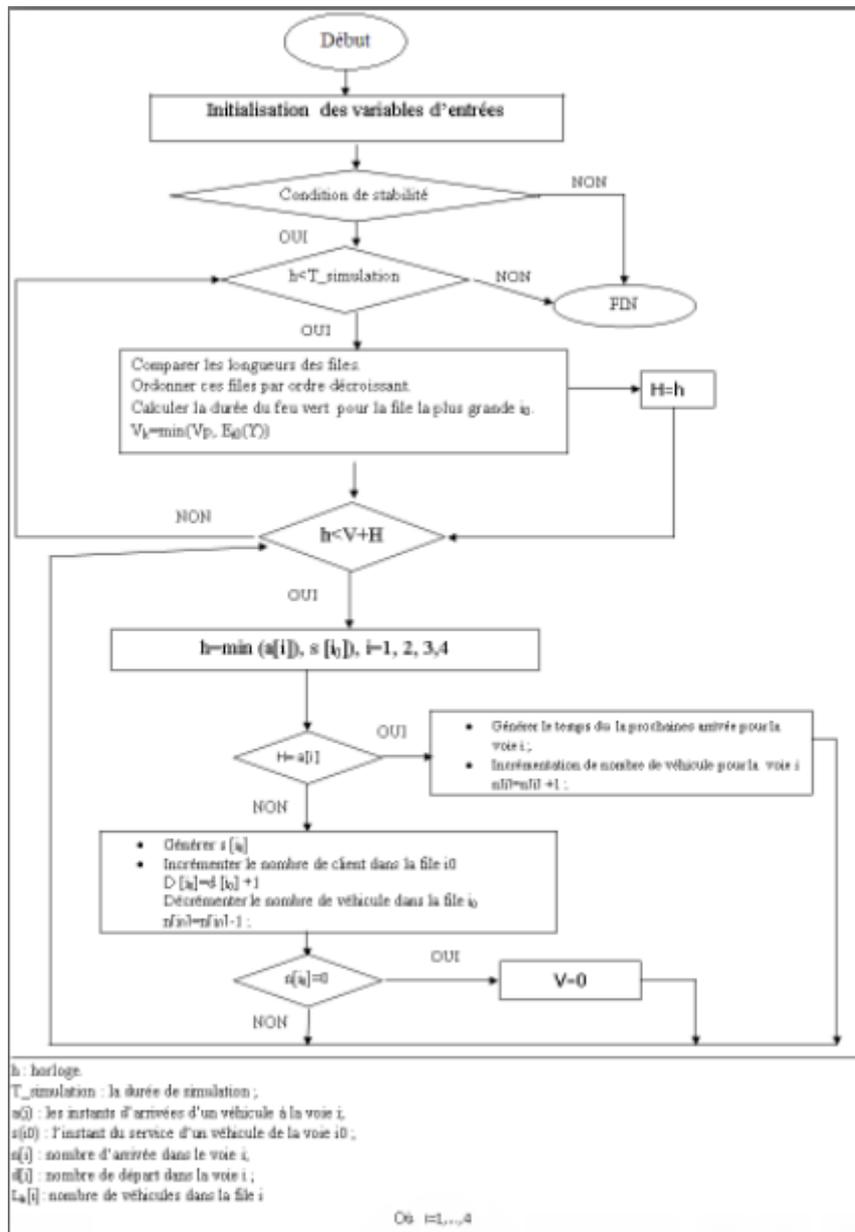


FIGURE 5.9 – Oranigramme de simulation