



Université A. Mira de Béjaïa

Faculté des Sciences Exactes

Département de Recherche Opérationnelle

Mémoire de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Recherche Opérationnelle

Option : Fiabilité et Evaluation des Performances des Réseaux

Thème

Gestion de Trafic Urbain à base de Réseau de Capteurs sans Fil : Cas de la Ville de Béjaïa



présenté par :

Alioua Imane & Djouder Amel

devant le jury composé de :

Président	M ^r N. KHIMOUM	M.A.B	U. A/Mira Béjaïa.
Rapporteur	M ^r L. BOUALLOUCHE	M.C.A	U. A/Mira Béjaïa.
Co-Rapporteur	M ^r F. SEMCHEDINE	M.C.B	U. A/Mira Béjaïa.
Examinateur	M ^r A. BADACHE	M.C.B	U. A/Mira Béjaïa.
Examinatrice	M ^{elle} N. BOUSBA	Doctorante	U. A/Mira Béjaïa.

Béjaïa 2012.

Remerciements

Notre profonde gratitude va à notre encadreur, M^{me} L. BOUALLOUCHE et notre co-promoteur Mr F. SEMCHEDINE pour l'honneur qu'ils nous ont fait en nous encadrant, pour leurs précieux conseils, orientations et la confiance placée en nous, dont nous garderons les souvenirs de ses qualités profondément humaines.

Nos sincères remerciements vont aussi à :

Mr N. KHIMOU pour l'honneur qu'elle nous a fait d'avoir acceptée de présider le jury d'examinations.

Mr A. BADACHE et M^{lle} N. BOUSABA pour l'honneur qu'elles nous ont accordé en examinant ce modeste travail.

*D*édicaces

*Cet évènement de ma carrière universitaire me donne la grande opportunité de
dédier ce modeste travail :*

A Celle qui a attendue avec patience les fruits de sa bonne Éducation : maman.

*A Celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait
toujours les grandes femmes : mon père.*

A mes deux grandes mères et mes deux grands pères.

A mes deux frères : Missipsa et Anis.

A mes deux sœurs : Chafika, NAhida et Rebiha.

A mes oncle et A mes tentes.

A mes fidèles et exceptionnels ami (es) : Latifa, Nacéra, Doria, Karima,

Fouzia, Nesrine, Souad, Tassadit, ...

A toi Imane et à Toute ta famille.

A toute ma promotion de RO(Fiabilité)

A tous ceux qui ont contribué de près et de loin à la réalisation de ce travail.

MERCI A VOUS TOUS

Amel

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :
A celle qui a attendue avec patience les fruits de sa bonne
éducation : ma mère ;
A celui qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté
fait toujours les grandes femmes : mon père ;
A la mémoire de mes grands parents ;
A mon proche oncle Mouloud et sa famille ;
A mes sœurs : Selma, Dounia et Aya ;
A tous mes cousins et cousines ;
A tous mes oncles et tantes ;
A tous mes camarades des scouts avec qui j'ai vécu mon enfance ;
A mes amies d'enfance Houda, Hanane ;
A celle que j'ai partagée les plus difficiles moments de préparation du
présent mémoire, mon amie Amel ;
A toute ma promotion de RG ;
A tous mes amis et tous ceux qui j'ai connu ;

Imane

Table des matières

<i>Table des matières</i>	3
<i>Liste des tableaux</i>	4
<i>Table des figures</i>	6
Introduction générale	1
1 Réseaux de capteurs sans fil	5
1.1 Introduction	5
1.2 Définitions	5
Capteur sans fil	5
Capteur intelligent	6
Capteur électromagnétique	6
Réseaux de capteurs sans fil	6
1.3 Architecture d'un réseau de capteur	7
Architecture d'un nœud	7
Architecture du réseau	7
1.4 Contraintes de conception des RCSFs	8
1.5 Caractéristiques principales d'un capteur	10
1.6 Domaines d'application	10
Applications militaires	11
Applications environnementales	11
Applications dans la santé	12
Applications domestiques	13

1.7	Conclusion	13
2	Gestion de trafic routier	14
2.1	Introduction	14
2.2	Congestion urbaine	14
2.2.1	Définition de la congestion	15
2.2.2	Nature et causes de la congestion routière dans les zones urbaines	15
	Congestion récurrente	15
	Congestion incidente	15
2.2.3	Evaluation de la congestion	16
2.3	Systèmes de transports intelligents (STI)	16
2.3.1	Application des STI à l'exploitation des réseaux routiers	17
2.3.2	Contexte et applications au milieu urbain	17
2.4	Contrôle dynamique par l'infrastructure	19
2.4.1	Les systèmes de gestion classiques des feux de circulation	19
2.4.2	Systèmes de gestion de trafic routier	21
2.5	Outils théoriques	22
2.5.1	Contrôle par logique floue	23
2.5.2	Algorithmes génétiques	23
2.5.3	Réseaux de neurones	24
2.5.4	Théorie des files d'attente	25
	Le système $M/M/1$	26
2.5.5	Réseaux de files d'attente	28
2.6	Conclusion	31
3	Modélisation du trafic urbain à base de réseau de capteurs sans fil	32
3.1	Introduction	32
3.2	Principe de fonctionnement	32
3.2.1	Présentation du système	33
3.3	Modélisation du système à base des RCSFs	34
3.3.1	Algorithme de contrôle du trafic pour une seule intersection	35
	3.3.1.1 Modélisation du système étudié par un réseau de files d'attente	36
3.4	Conclusion	43

4	Simulation des mouvements des véhicules	44
4.1	Introduction	44
4.2	Définition de la simulation	44
4.3	Les étapes de la simulation	44
4.4	Simulation par événement discrets	45
4.4.1	Simulateurs orientés événements	45
4.4.2	Simulation et résultats numériques	46
4.5	Conclusion	48
	Conclusion générale et perspectives	49
	Bibliographie	52
	Annexe	56

Liste des tableaux

4.1	Résultats de simulation pour l'intersection de Naciria	47
4.2	Résultats de simulation pour l'intersection des Aurès	47
4.3	Résultats de simulation pour l'intersection de Tobal	47
4.5	Flux directionnel pour le carrefour de Naciria	56
4.6	Flux directionnel pour les Aurès	56
4.7	Flux directionnel pour l'intersection de Tobal	56

Table des figures

1.1	Composantes d'un nœud capteur	7
1.2	L'architecture de communication d'un réseau de capteurs	8
1.3	Rayon de communication et sensation d'un capteur	10
1.4	La surveillance militaire en utilisant les RCSFs	11
1.5	Le contrôle de l'environnement utilisant les RCSFs	12
1.6	La surveillance médicale utilisant les RCSFs	12
2.1	Réseau " ordonné " sans connexion arrière (réseau feed-forward)	25
2.2	File d'attente simple	26
2.3	Trois exemples de réseaux de files d'attente (ouvert, fermé, et mixte)	30
2.4	Routage vers la file la plus courte	31
2.5	Routage cyclique	31
3.1	Détection d'un véhicule par un capteur électromagnétique.	33
3.2	Emplacement des capteurs dans les trois intersections	34
3.3	Présentation d'un cycle avec successions de 4 phases	37
3.4	Modèle de de réseau de files d'attente des trois intersections	42
4.1	Echéancier des événements	46
4.2	Réseaux routier de Bejaia représente le chemin entre Tobal et les Aurès.	56
4.3	Écran MATLAB	56
4.4	Densité de probabilité et fonction de répartition de la loi exponentielle	56
4.5	Arrivées Poissoniennes	56
4.6	Temps d'interarrivées	56
4.7	Décomposition probabiliste d'un processus de Poisson	56

4.8	Superposition d'un ensemble de processus de Poisson	56
4.9	Densité de probabilité de la loi Gamma	56

Introduction générale

De nos jours, se déplacer est devenu un aspect 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. En effet, des millions de véhicules transportent des personnes et des marchandises sur les réseaux routiers chaque jour. Malheureusement, cette activité présente de sérieux problèmes comme les accidents, les pertes de vies humaines qui en découlent, et la congestion dans les routes qui cause à son tour une augmentation de la consommation de combustible et de la pollution, ainsi que les retards de livraison pour le transport de marchandises, et non des moindres, le stress des usagers du réseau routier passant une grande partie de leur temps dans des embouteillages interminables.

L'augmentation de la congestion sur les routes urbaines, en particulier aux heures de pointe, est un problème critique dans de nombreux pays et est devenue une préoccupation majeure pour les spécialistes du transport et des décideurs. Les méthodes existantes pour la gestion du trafic, de surveillance et de contrôle ne sont pas suffisamment efficaces en termes de performance, du coût et de l'effort nécessaire pour l'entretien et le soutien. Cette augmentation de l'urbanisation et de la congestion créent un besoin de faire fonctionner les systèmes de transport avec une efficacité maximale. L'une des mesures pour faire face à ce problème est le contrôle des feux de circulation placés dans des intersections. Un contrôleur de feux de circulation a pour but de réduire les arrêts et les retards de l'ensemble des véhicules ou de maximiser le débit.

Jusqu'à présent, la plupart des villes Africaines en général et Algériennes en particulier utilisent des commandes de signalisation classique (à temps fixe) réglées une seule fois

tenant compte de prévisions du trafic. On peut observer par exemple que la durée des feux est la même à 8H00 du matin, où la circulation est complètement embouteillée par les camions de marchandises traversant la ville et les particuliers se rendant à leur travail, qu'à 22H00 le soir où la plupart des rues sont complètement dégagées. Ce comportement en soi peut lui même être générateur de congestion dans la mesure où les commandes d'infrastructure ne s'adaptent pas aux fluctuations du trafic. On voit bien là, la nécessité de systèmes plus dynamiques, qui ont fait l'objet ces dernières années d'une attention particulière.

On parle alors des Systèmes de Transport Intelligents (En anglais : Intelligent Transportation Systems (ITS)).

De manière schématique, un système de contrôle dynamique de trafic dispose des commandes permettant de contrôler le trafic et des capteurs lui donnant des informations sur l'état du trafic : les nombres de véhicules sur certaines rues ou intersections du réseau routier. Les informations obtenues sont traitées par un ordinateur qui a pour mission de donner aux commandes les valeurs (durée et synchronisation des feux) permettant de minimiser une certaine fonction (la longueur des files d'attente aux intersections, du temps d'attente moyen aux feux, du temps d'attente moyen de la plus longue file d'attente, etc.) exprimant la congestion du réseau routier. Dans un système de contrôle dynamique, la durée des feux serait donc recalculée à intervalle régulier dans le souci de minimiser la congestion.

La mise en place d'un tel système nécessite la surveillance de l'état réel du trafic avec des détecteurs et des capteurs comme les caméras de surveillance, les radars, les tuyaux pneumatiques, etc. Mais ces derniers ont un coût d'équipement trop élevé et leur précision dépend des conditions d'environnement. Donc, il est évident d'utiliser un dispositif plus efficace adaptable aux conditions environnementales, l'excellent candidat est le réseau de capteurs sans fil(RCSF). Les capteurs peuvent être déployés le long d'une route pour détecter le débit, la vitesse, et l'occupation continue en analysant le signal magnétique autour d'eux. L'avantage d'utiliser les RCSFs est :

- Le RCSF peut surveiller et évaluer les routes automatiquement et en continu, avec un peu d'effort humain.
- Le RCSF peut fonctionner dans les nuits et les conditions météorologiques abominables,

quand il y a du brouillard ou de la poussière.

- Le RCSF est capable d'enregistrer avec exactitude les données sur les flux de circulation de la route pour une analyse plus approfondie, ce qui est difficile pour les caméras vidéo.

La densité de la ville de Béjaia est de $481 \text{ hab}/\text{km}^2$ en 2008, alors qu'elle était de $276 \text{ hab}/\text{km}^2$ en 1999. Cette nette évolution de plus de 80%, en moins d'une décennie, se traduit par plusieurs problèmes, notamment celui de la congestion à cause de la croissance du nombre de véhicules dans cette zone urbaine.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation du trafic routier au niveau du chemin allant de Tobal vers les Aurès passant par le carrefour de Naciria (un chemin de la ville fréquemment congestionné). De ce fait, nous considérons que les intersections de ce chemin sont gérées par des feux de signalisation où des capteurs sans fil sont déployés sur les différentes voies afin de récupérer l'état du trafic (nombres de véhicules par voie) et le communiquer à la station de contrôle. La modélisation de ce système va permettre de dégager les différentes fonctions pour la gestion dynamique des feux (les durées d'activation des feux vert et rouge), afin de minimiser la congestion et équilibrer le trafic sur les différentes voies. Par la suite, nous avons validé le modèle par une simulation à événements discrets.

A cet effet, nous avons organisé ce mémoire comme suit :

Le premier chapitre donne un aperçu général sur les réseaux de capteurs sans fil, il présente ses caractéristiques, leurs applications et leur architecture.

Le deuxième chapitre est consacré au concept de congestion et la définition des systèmes de transport intelligents (STI), ainsi que les différents outils théoriques utilisés pour la modélisation du trafic routier, précisément nous avons présenté la théorie des files d'attente qu'on a utilisée pour la modélisation du chemin.

En ce qui concerne le troisième chapitre, nous allons donner un aperçu général sur le fonctionnement des capteurs électromagnétiques, ensuite, nous modéliserons un sous réseau routier de la ville de Bejaia (les trois intersections : Tobal, Naciria et Aurès) à base de RCSF par un réseau de files d'attente ouvert et nous allons déterminer les principaux

événements influant sur le système.

Le dernier chapitre reflète les résultats de la simulation par événements discrets du réseau de files d'attente correspondant au chemin (Tobal-Aurès).

En fin, notre mémoire s'achève par une conclusion générale résumant les grands points qui ont été abordés dans ce mémoire, ainsi que des perspectives.

Réseaux de capteurs sans fil

1.1 Introduction

Depuis quelques années, le marché des réseaux et des applications sans fil est considérablement développé. De ce constat, une nouvelle branche s'est créée pour offrir des solutions économiquement intéressantes pour la surveillance à distance et le traitement des données dans les environnements complexes et distribués ; il s'agit des réseaux de capteurs sans fil (RCSFs), en anglais Wireless Sensor Networks (WSNs).

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs classifications ainsi que leurs domaines d'applications.

1.2 Définitions

Capteur sans fil

Les technologies permettant l'acquisition numérique d'informations sont désormais d'usage courant. Elles sont le plus souvent employées pour relever la température, l'humidité, mesurer l'intensité lumineuse ou sonore, et sont regroupées sous le vaste terme capteur. Récemment, ces capteurs se sont vus ajouter des capacités de communication, filaire dans un premier temps puis par onde radio dans un second. Il est alors devenu possible d'accéder à distance aux informations relevées par les capteurs.

Aujourd'hui, le mot "*capteur*" a pris de nombreux sens différents. Lorsque nous l'évoquerons, nous désignerons un objet pouvant relever une donnée de l'environnement (un capteur au

sens premier du terme), augmenté de capacités de calcul et de communication ainsi que de batteries lui conférant une autonomie [1].

Capteur intelligent

Les capteurs intelligents (Smart Sensors) sont des dispositifs matériels dans lesquels coexistent le(s) capteur(s) et les circuits de traitement et de communication. Leurs relations avec des couches de traitement supérieures vont bien au-delà d'une simple "transduction de signal". Les capteurs intelligents sont des "capteurs d'informations" et non pas simplement des capteurs et des circuits de traitement du signal juxtaposés. De plus, ils ne sont pas des dispositifs banalisés car chacun de leurs constituants a été conçu dans l'objectif d'une application bien spécifique [19].

Capteur électromagnétique

C'est un type de capteur sans fil fixe utilisé notamment pour la gestion du trafic routier. L'unité d'acquisition utilisée est un magnétomètre, permettant d'enregistrer les variations du champ magnétique terrestre. Comme indiqué ci-dessus, la contrainte énergétique peut facilement être levée, mais certains auteurs considèrent toutefois l'utilisation de batteries en conseillant leur durée à 2 ou 3 ans [29]. Dans le cadre des STI, le rôle de tels dispositifs va être de relever des informations sur le trafic routier.

Réseaux de capteurs sans fil

Les réseaux de capteurs sans fil sont considérés comme un type spécial des réseaux 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.

Les nœuds capteurs sont des capteurs intelligents "*smart sensors*", capables d'accomplir trois tâches complémentaires : le relevé d'une grandeur physique, le traitement éventuel de cette information et la communication avec d'autres capteurs. L'ensemble de ces capteurs, déployés pour une application, forme un réseau de capteurs. Le but de celui-ci est de surveiller une zone géographique, et parfois d'agir sur celle-ci (il s'agit alors de réseaux de capteurs actionneurs).

Le réseau peut comporter un grand nombre de nœuds (des milliers). Les capteurs sont placés de manière plus ou moins aléatoire (par exemple par largage depuis un hélicoptère) dans des environnements pouvant être dangereux. Toute intervention humaine après le déploiement

des nœuds capteurs est la plupart du temps exclue. Le réseau doit donc s'autogérer. Afin que les nœuds capteurs travaillent d'une façon coopérative, les informations recueillies sont partagées entre eux par voie hertzienne. Le choix du lien radio plutôt que du lien filaire permet un déploiement facile et rapide dans un environnement pouvant être inaccessible pour l'être humain [15, 16, 13].

1.3 Architecture d'un réseau de capteur

Architecture d'un nœud

La figure (1.1) reprise de [16], fournit une vue globale d'une architecture typique pour un nœud capteur. Un nœud capteur peut être divisé en quatre unités de base : captage, traitement, communication et contrôle d'énergie [33, 3].

L'unité de captage englobe généralement deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur analogique-numérique qui transforme les signaux analogiques produits par les capteurs en un signal digital. Le signal est ensuite transmis à l'unité de traitement. L'unité de traitement, généralement associée à une petite unité de stockage, exécute les procédures permettant au nœud de collaborer avec les autres nœuds du réseau pour effectuer la tâche assignée au réseau. La connexion du nœud au réseau est gérée par l'unité de communication. L'unité de contrôle d'énergie, constitue l'un des systèmes les plus importants dans un nœud capteur. Elle peut être représentée par un système de rechargement d'énergie tel que les cellules solaires.

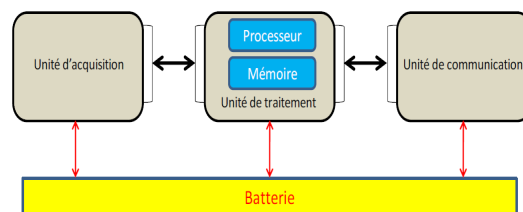


FIGURE 1.1 – Composantes d'un nœud capteur

Architecture du réseau

L'architecture du réseau de capteurs est montrée dans la figure (1.2). L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur de tâche "*Task Manager Node*". Le nœud directeur de tâche est relié à l'Internet ou au

satellite à travers un nœud destinataire appelé puits "*sink*". Ce dernier agit en tant que passerelle pour le réseau de capteurs (c'est-à-dire qu'il relie des réseaux de capteurs à d'autres réseaux). Ce nœud est responsable, en plus de la collecte des rapports, de la diffusion des demandes sur les types de données requises aux capteurs via des messages de requêtes. Il a également d'autre capacité de traitement de l'information pour une transformation ultérieure s'il y a lieu.

Les nœuds capteurs sont habituellement dispersés dans une zone de capture appelée "champ de capteur". Les nœuds capteurs rassemblent les données et les conduisent au destinataire. De cette manière, les utilisateurs peuvent rechercher l'information dans les nœuds destinataires pour surveiller et commander l'environnement à distance.

Notons qu'un réseau de capteurs peut contenir plusieurs nœuds puits diffusant des intérêts (une description des données requises par le nœud destinataire en utilisant une appellation combinée attribut-valeur) différents.

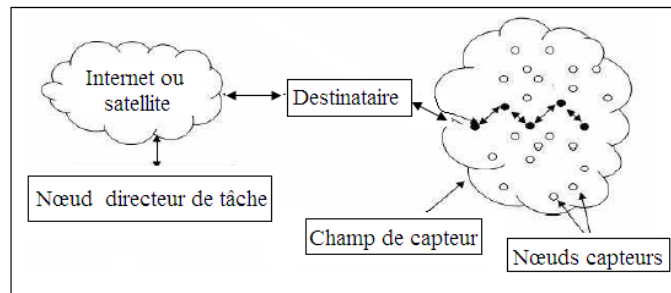


FIGURE 1.2 – L'architecture de communication d'un réseau de capteurs

1.4 Contraintes de conception des RCSFs

Les principaux facteurs et contraintes influençant la conception des RCSFs peuvent être résumés comme suit :

- ↔ **La tolérance aux fautes** : Certain nœuds peuvent générer des erreurs ou ne plus fonctionner à cause d'un manque d'énergie, un problème physique ou une interférence. Ces problèmes n'affectent pas le reste du réseau, c'est le principe de la tolérance aux fautes. La tolérance aux fautes est la capacité de maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions dues à une erreur intervenue sur un ou plusieurs capteurs.
- ↔ **L'échelle** : Le nombre de nœuds déployés pour un projet peut atteindre le million. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter

nodales et nécessite que le puits "sink " soit équipé de beaucoup de mémoire pour stocker les informations reçues.

- ↪ **Les coûts de production** : Souvent, les réseaux de capteurs sont composés d'un très grand nombre de nœuds. Le prix d'un nœud est critique afin de pouvoir concurrencer un réseau de surveillance traditionnel. Actuellement un nœud ne coûte souvent pas beaucoup plus que 1\$. A titre de comparaison, un nœud Bluetooth, pourtant déjà connu pour être un système low-cost, revient environ à 10\$.
- ↪ **L'environnement** : Les capteurs sont souvent déployés en masse dans des endroits tels que des champs de bataille au delà des lignes ennemies, à l'intérieur de grandes machines, au fond d'un océan, dans des champs biologiquement ou chimiquement souillés,... Par conséquent, ils doivent pouvoir fonctionner sans surveillance dans des régions géographiques éloignées.
- ↪ **La topologie de réseau** : Le déploiement d'un grand nombre de nœuds nécessite une maintenance de la topologie. Cette maintenance consiste en trois phases : déploiement, post-déploiement (les capteurs peuvent bouger, ne plus fonctionner,...), redéploiement de nœuds additionnels.
- ↪ **Les contraintes matérielles** : La principale contrainte matérielle est la taille du capteur. Les autres contraintes sont que la consommation d'énergie qui doit être moindre pour que le réseau survive le plus longtemps possible, qu'il s'adapte aux différents environnements (fortes chaleurs, eau,..), qu'il soit autonome et très résistant.
- ↪ **Les médias de transmission** : Dans un réseau de capteurs, les nœuds sont reliés par une architecture sans-fil. Pour permettre des opérations sur ces réseaux dans le monde entier, le média de transmission doit être énorme. On utilise le plus souvent l'infrarouge, le Bluetooth et les communications radio ZigBee.
- ↪ **La consommation d'énergie** : Un capteur, de par sa taille, est limité en énergie ($< 1.2V$). Dans la plupart des cas le remplacement de la batterie est impossible. Ce qui veut dire que la durée de vie d'un capteur dépend grandement de la durée de vie de la batterie. Dans un réseau de capteurs (multi-sauts) chaque nœud collecte des données et envoie/transmet des valeurs. Le dysfonctionnement de quelques nœuds nécessite un changement de la topologie du réseau et un ré-routage des paquets. Toutes ces opérations sont gourmandes en énergie, c'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire cette consommation.

1.5 Caractéristiques principales d'un capteur

Deux entités sont fondamentales dans le fonctionnement d'un capteur : l'unité d'acquisition qui est le cœur physique permettant la prise de mesure et l'unité de communication qui réalise la transmission de celle-ci vers d'autres dispositifs électroniques. Ainsi, fonctionnellement chaque capteur possède un rayon de communication (R_c) et un rayon de sensation (R_s). La Figure (1.3) montre les zones définies par ces deux rayons pour le capteur A. La zone de communication est la zone où le capteur A peut communiquer avec les autres capteurs (le capteur B dans la Figure). D'autre part, la zone de sensation est la zone où le capteur A peut capter l'événement.

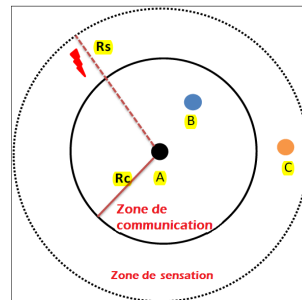


FIGURE 1.3 – Rayon de communication et sensation d'un capteur

1.6 Domaines d'application

Les domaines d'application des réseaux de capteurs restent encore peu mis en pratique la plupart du temps. Les nombreux projets existants ont le plus souvent attiré à l'observation de zones inaccessibles ou à la surveillance d'environnements sensibles. Il y est essentiellement question de suivi d'objets mobiles [9] (tels que des animaux, des véhicules ou encore des individus).

L'observation de cibles fixes est aussi l'un des objectifs de ces réseaux [24]. Ils peuvent également assurer la surveillance des limites d'une zone [35], ou celle de la totalité de la zone dont on désire d'avantage d'informations. Dans ce cas, différents paramètres propres à l'application sont à considérer. Cette nouvelle technologie promet dans beaucoup de domaines de nouvelles applications [15].

Applications militaires

Dans les applications de sécurité en général, la réduction de latence d'une transmission d'alarme, d'une manière significative, est plus importante que la réduction de coût énergétique des transmissions. La communication immédiate et fiable des messages d'alarme est la condition primaire de système, parce que les événements d'alarme sont rares et importants.

- Surveillance du champ de bataille.
- Reconnaissance des forces ennemies.
- Repérage des cibles.
- Evaluation des dommages de la bataille.
- Détection et reconnaissance d'attaque nucléaire, biologique et chimique.



FIGURE 1.4 – La surveillance militaire en utilisant les RSCFs

Applications environnementales

L'application de collection de données dans un environnement est caractérisée par le grand nombre de nœuds, qui captent et transmettent les données à la station de base, d'une manière continue et sous des topologies relativement statiques. Ces réseaux exigent généralement des débits très bas, une synchronisation précise et une durée de vie extrêmement longue.

Les paramètres typiques d'environnement surveillé, comme la température, l'intensité de la lumière et l'humidité, ne changent pas rapidement, et par conséquent, n'exigent pas des taux de transmission élevés. Pour beaucoup de scénarios, l'intervalle entre les transmissions peut être de l'ordre de quelques minutes (1 et 15 minutes). En plus, les applications de contrôle de l'environnement n'ont pas de conditions strictes de latence, les échantillons de données peuvent être retardés à l'intérieur du réseau pour des périodes modérées, selon le besoin et pour améliorer l'efficacité du réseau, sans affecter de manière significative

l'exécution d'application. En général, les données sont rassemblées pour une future analyse et pas pour des opérations en temps réel. Les applications de contrôle d'environnement incluent :

- Le repérage des mouvements des oiseaux, des petits animaux et des insectes.
- La surveillance des conditions environnementales qui affectent les récoltes et le bétail.
- La détection de feu de forêt.
- La détection d'inondation.
- Etude de pollution. . .

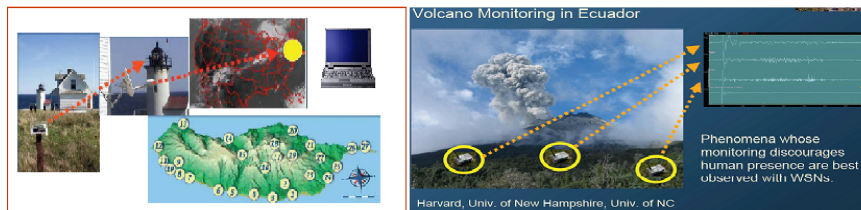


FIGURE 1.5 – Le contrôle de l'environnement utilisant les RCSFs

Applications dans la santé

Les réseaux de capteurs sont appliqués aussi dans le domaine médical, cette classe inclut des applications comme :

- Fourniture d'interfaces pour les handicapés.
- Repérage et surveillance des médecins et des patients dans les hôpitaux.
- Le diagnostic et la télésurveillance des données physiologiques humaines.

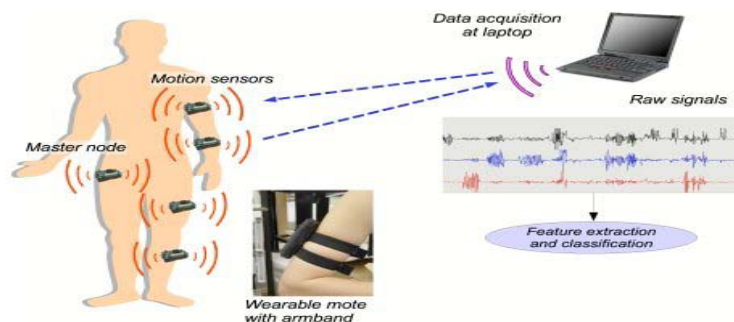


FIGURE 1.6 – La surveillance médicale utilisant les RCSFs

Applications domestiques

C'est une autre classe d'applications où plusieurs concepts sont déjà conçus par les chercheurs et les architectes, comme la maison intelligente (domotique), où des nœuds capteurs sont intégrés à l'intérieur des dispositifs domestiques permettant l'interconnexion et l'interactivité. Le calcul et le captage dans cet environnement doivent être fiables et persistants.

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est intéressé aux définitions de base des réseaux de capteur sans fil, ainsi que leur architecture, leurs caractéristiques et leurs domaines d'application. Les réseaux seront utilisés afin de résoudre la problématique de la régulation du trafic urbain. La présentation de ces derniers est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre 2

Gestion de trafic routier

2.1 Introduction

Le transport routier est un élément fondamental dans le fonctionnement des sociétés modernes. En effet, des millions de véhicules transportent des personnes et des marchandises sur les réseaux routiers chaque jour. La gestion d'un tel réseau est devenue un élément essentiel. Dans ce chapitre nous présentons des généralités sur la congestion urbaine, les systèmes de transport intelligents, et leurs applications pour gérer la circulation routière.

2.2 Congestion urbaine

La congestion est citée comme un mal majeur et grandissant dans les milieux urbains. De nombreux conducteurs se retrouvent chaque jour dans la congestion et les embouteillages, bien que son importance et sa fréquence varient d'un endroit à l'autre.

Les autorités urbaines, régionales et provinciales de transport s'appliquent à gérer cette problématique au moyen d'une vaste gamme de mesures. Individuellement, les conducteurs n'interprètent pas tous de la même façon le sens de la congestion et n'ont pas la même perception. Pour certains, il s'agit d'un véritable embouteillage avec des arrêts complets et de longs retards. Pour d'autres, il s'agit plutôt d'une situation où l'on avance lentement, ou plus généralement, où on se déplace à une vitesse inférieure à la limite permise.

2.2.1 Définition de la congestion

La définition la plus simple et la plus générale consiste à dire que la congestion existe lorsque la demande de circulation excède la capacité routière. Il n'y a pas d'indicateur ni d'approche standard permettant de déterminer l'étendue de la congestion. Dans la zone métropolitaine, la situation est définie comme congestion lorsque la vitesse moyenne est inférieure de plus de 50% à la vitesse en situation d'écoulement libre [30]

2.2.2 Nature et causes de la congestion routière dans les zones urbaines

Lorsque l'on traite de la congestion, il est important de faire la distinction entre les deux principaux types de congestion : la congestion récurrente et la congestion incidente.

Congestion récurrente

La congestion récurrente se produit principalement lorsqu'un trop grand nombre de véhicules utilisent le réseau routier en même temps. Typiquement, la congestion récurrente a lieu les jours de la semaine, le matin et l'après-midi, lorsque la vaste majorité des gens se rendent au travail ou à l'école et reviennent à la maison aux mêmes heures. Dans les grandes zones urbaines, la période de pointe s'observe généralement entre 6h et 9h30 le matin, et entre 15h30 et 19H en après-midi. Dans les zones urbaines plus petites, la période de pointe s'étend normalement sur une période plus courte (une heure ou deux).

La hausse de la congestion récurrente qui a lieu pendant les périodes hors pointe est une question qui suscite de l'intérêt. Cette congestion est attribuable à une croissance rapide de la demande de déplacements pendant les heures hors pointe.

Congestion incidente

La congestion incidente associe à des conditions aléatoires ou spéciales et à des événements particuliers, les quatre causes principales de la congestion incidente sont :

- Les incidents de la circulation (les pannes, les accidents graves).
- Les chantiers de construction.
- Les conditions météorologiques.
- Les événements spéciaux.

En raison du caractère aléatoire de ce type de congestion, elle est plus difficile à prévoir, à quantifier et à gérer. Les répercussions de la congestion incidente sont significatives. En effet, la fiabilité et la prévisibilité des temps de déplacement revêtent une très grande

importance pour le public, les industries qui ont recours au transport de marchandises qui doivent respecter les délais de livraisons. Le manque de données sur les incidents et sur leur impact sur les temps de déplacement a mené certains organismes à recourir à des estimations provisoires de la congestion incidente [30].

2.2.3 Evaluation de la congestion

La congestion a de nombreuses conséquences, à la fois pour les usagers des installations de transport et pour le public. On peut distinguer quatre catégories de conséquences [30] :

- Conséquences économiques.
- Conséquences environnementales.
- Conséquences sur la sécurité routière.
- Conséquences sociales et structurelles.

La congestion de circulation peut avoir à la fois des conséquences positives et négatives sur la sécurité routière. D'une part, les vitesses réduites en conditions de congestion peuvent réduire le nombre d'accidents dans la file. D'autre part, la circulation stop-and-go risque d'augmenter le nombre d'accidents d'emboutissement arrière dans la file. En outre, l'extrémité de la file est un risque potentiel pour les véhicules en approche, en particulier sur les autoroutes où les vitesses sont élevées.

2.3 Systèmes de transports intelligents (STI)

Le terme de "Systèmes (ou Services) de Transport Intelligents" (STI ou ITS, pour "Intelligent Transport Systems") désigne les applications des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) aux transports, voire à la mobilité en général. Le terme système est vague et se décline en un ensemble de moyens mis en place pour gérer au mieux les contraintes liées au trafic routier, telles que les embouteillages, la sécurité ou même la pollution. En particulier, ces systèmes offrent un caractère réactif à une infrastructure pourtant fixe, mais dont la population peut grandement varier.

Les STI collectent, stockent, traitent et distribuent de l'information relative à l'état d'infrastructures, à la progression de véhicules et au mouvement des personnes et des marchandises.

2.3.1 Application des STI à l'exploitation des réseaux routiers

Les principales fonctions d'exploitation du réseau liées aux STI sont les suivantes :

- * Surveillance du réseau, maintien de la viabilité et de la sécurité routières, contrôle du trafic, information d'aide aux déplacements et aux usagers et gestion de la demande. La surveillance du réseau, est une des fonctions clés de la collecte d'information courante sur le réseau routier et du soutien des autres activités d'exploitation du réseau. Par conséquent, même si la surveillance fait partie intégrante de tous les services de STI, elle ne constitue habituellement pas un service en soi. Afin d'améliorer la viabilité et la sécurité routières, des mesures proactives et réactives peuvent être déployées. Les mesures proactives mettent la priorité sur la prévention des incidents et de la congestion, et les mesures réactives mettent la priorité sur la détection et la vérification des incidents et des conditions routières dangereuses, les interventions et le dégagement, et sur le rétablissement des conditions normales.
- * L'information aux voyageurs est une mesure de prévention secondaire. La diffusion d'avertissements en temps opportun, quant aux conditions de circulation dangereuses et à la congestion, réduit le nombre d'accidents.
- * La sécurité routière ne peut être assurée uniquement qu'au moyen de mesures préventives. Il est important de surveiller constamment l'état de la route même et de la circulation, et de réagir aux situations.

2.3.2 Contexte et applications au milieu urbain

Les STI sont appliqués aussi dans le milieu urbain dans :

Les intersections

Le champ d'application des STI en milieu urbain est très large : en premier lieu, ces derniers agissent sur les intersections, en se chargeant d'appliquer une stratégie de changement des feux de circulation. Cette gestion des feux va représenter un aspect essentiel de la fluidité du trafic routier dans une ville [31].

Le stationnement

La gestion du stationnement est également primordiale et a une incidence directe sur la fluidité du trafic : il paraît logique de dire que l'utilisation de la voiture en milieu urbain

repose en partie sur le fait de savoir s'il y a une place disponible ou non sur le lieu d'arrivée. Il faut savoir qu'en moyenne, en France par exemple, 10% des véhicules en circulation à un instant donné cherchent une place où se garer. Les STI vont aider à prendre des décisions, mais également informer les utilisateurs ou encore contrôler les véhicules [31].

Par Exemple, des détecteurs peuvent être utilisés afin de détecter la présence d'un véhicule sur une place, et calculer sa durée de stationnement. Ceci a été constaté dans la ville d'Amiens via des stationnements "minute" : une borne est associée à une place, et dès lors qu'un véhicule s'y gare, un compte à rebours se déclenche pour une durée déterminée. Si cette durée est dépassée, les agents de la voie publique sont automatiquement prévenus. Nous pouvons également citer l'utilisation de panneaux à messages variables (PMV) pour les parkings, systèmes très répandus dans les grandes métropoles qui indiquent le nombre de places disponibles (ceci n'utilisant pas nécessairement des détecteurs, mais étant généralement calculé en fonction des entrées / sorties dans le parking en lui-même).

La sécurité routière

Concernant la sécurité routière, les STI ont une grosse carte à jouer, principalement autour de deux catégories. D'une part, les systèmes hors-véhicules tels que les PMV vont permettre d'avertir l'utilisateur en cas de danger : vitesse d'un utilisateur trop élevée, conditions météo inadaptées, et travaux. Le but ici est d'influencer l'utilisateur. D'autre part, les systèmes sur-véhicule sont également nombreux et très développés : détection de piétons ou obstacles, capots intelligents capables de se soulever en cas d'impact avec un piéton, systèmes embarqués (exemple : appel des secours automatique en cas de choc), régulateur de vitesse, vision nocturne (à l'aide de caméras), etc [31].

Les ronds-points

Certains travaux abordent la gestion des ronds-points, en se basant sur les priorités existantes. Dans de nombreux pays, il est, par exemple, commun de donner la priorité aux usagers étant déjà à l'intérieur d'un rond-point.

Ce qui en ressort apparaît comme une évidence : soit deux flots, chacun étant sur une voie respectivement au cœur du rond-point et sur les côtés, la priorité doit être donnée au flot de la plus grande importance afin d'obtenir une gestion optimale du trafic. Les feux quant à eux améliorent grandement la fluidité du trafic, mais uniquement en cas de débit suffisamment élevé [31].

Rapport avec la pollution

Concernant la pollution, les STI peuvent aider à réduire l'énergie et l'émission des gaz à effet de serre provoquée par les véhicules, ceci à travers de plusieurs points. Tout d'abord, la connaissance apportée par les STI peut influencer l'utilisateur à prendre les transports en commun, moins consommateurs et qui ont tendance à aller vers l'écologie (un bus émet 0.03 kg de CO₂ par passager-kilomètre).

De même, le développement des systèmes partagés va aider à prendre cette décision : vélo ou même voitures électriques (exemple : Auto Bleue à Nice ou Mobility Car Sharing en Suisse). Dans ce premier cas de figure, il faut tout de même prendre garde au trafic induit : moins d'embouteillages et de contraintes peuvent décider un utilisateur à prendre sa voiture [31]. Ainsi, la gestion du trafic routier permet l'optimisation des déplacements et une viabilisation des temps de parcours : réduction des embouteillages en conséquence, des séquences d'arrêts et reprises qui sont les principales sources de consommation de carburant et d'émission de gaz à effet de serre. Enfin, le comportement des conducteurs joue un rôle majeur sur la consommation de carburant. Au travers de systèmes informatifs, les STI peuvent contribuer à l'apprentissage de valeurs écologiques auprès de l'utilisateur.

2.4 Contrôle dynamique par l'infrastructure

Le développement du trafic routier urbain a amené à concevoir des systèmes intelligents. L'une des particularités de ces systèmes est leur besoin de dynamisme et de réactivité. Afin de pouvoir agir sur une situation, ces derniers ont besoin de connaître des informations sur ce qu'il se déroule à des endroits bien précis, et prendre des décisions en conséquence.

2.4.1 Les systèmes de gestion classiques des feux de circulation

La mise en place d'un système de feux à un carrefour dans une intersection réalise une séparation dans le temps de l'admission de différents courants de véhicule. Ces derniers sont soit directs, soit des courants de tourne à gauche, ou des courants de tourne à droite [30].

Le temps d'attente total de tous les véhicules [30]

Le temps d'attente total de tous les véhicules est très important en théorie de trafic puisqu'il permet d'évaluer les coûts de la congestion.

Soient W : le temps d'attente total des véhicules ; d : le délai d'attente d'un véhicule.
Alors :

$$E[W] = E[d].E[A(k)] \quad (2.1)$$

Le temps moyen d'attente durant un cycle [30]

Soient :

$A(t)$: le nombre de véhicules arrivant dans le système dans l'intervalle $[0, t]$, cet intervalle commence par le début de la période rouge. $A(t) \rightsquigarrow P(\lambda)$.

$N(0)$: La longueur de la file d'attente à $t = 0$ (c.à.d. au début de la période rouge).

W_C : Le temps d'attente de tous les véhicules durant le cycle.

W_R : Le temps d'attente de tous les véhicules durant la période rouge.

W_V : Le temps d'attente de tous les véhicules durant la période verte.

$N(t)$: Le nombre de véhicules dans la file d'attente au temps " t ", chaque conducteur prend une période " p " pour franchir le carrefour. On suppose que la période verte (V) se compose de " m " départ chacun de longueur " p ".

L'espérance mathématique nous donne les résultats suivants :

$$E(W_R) = E\left[\int_0^R (N(0) + A(t))dt\right] = RE[N(0)] + \frac{\lambda R^2}{2} \quad (2.2)$$

$$E(W_V) = E\left[\int_R^C N(t)dt\right] = \frac{\lambda_p R}{2(1 - \lambda_p)^2} + \frac{p(2\lambda RE[N(0)] + (\lambda R)^2 + \lambda R)}{2(1 - \lambda_p)} \quad (2.3)$$

D'après les relations (2.2)-(4.4), le temps moyen d'attente durant un cycle pour tous les véhicules est :

$$E(W_C) = E(W_R) + E(W_V) = \frac{\lambda R}{2(1 - \lambda_p)} \left(R + \frac{2E[N(0)]}{\lambda} + p \left(1 + \frac{1}{1 - \lambda_p} \right) \right) \quad (2.4)$$

D'où, le temps moyen d'attente d'un véhicule par cycle est :

$$E[d] = \frac{\lambda R}{2C(1 - \rho)} \left(R + \frac{2E[N(0)]}{\lambda} + p \left(1 + \frac{1}{1 - \rho} \right) \right) \quad (2.5)$$

Remarque

- Si le trafic est suffisamment fluide $E[N(0)]$ peut être négligeable ;
- Si non, il faut calculer la valeur de $E[N(0)]$.

La valeur de $E[N(0)]$ est :

$$E[N(0)] = \frac{m-1}{2} + (-0.5 - 0.32m + \frac{m}{160})\frac{m+q}{m}\rho + \quad (2.6)$$

$$\frac{[(q+m)(m-q-1)\rho^3 + [(q+1)^2 - 3m^2 + 3m - 1]\rho + 3m(m-1)\rho - m(m-1)]}{2(1-\rho)[m - (m-q)\rho]}$$

Avec, $m = \frac{V}{p}$ et $q = \frac{R}{p}$

2.4.2 Systèmes de gestion de trafic routier

Les avancées ont été permises grâce à l'introduction de plusieurs solutions novatrices en termes de gestion du trafic routier : au total, ce sont plus d'une vingtaine de projets qui sont nés durant ces trente dernières années ([42]).

Dans cette partie, nous allons essentiellement parler de deux systèmes ne sont pas nécessairement les plus performants, mais représentent les deux principaux systèmes de gestion du trafic routier utilisés dans le monde ([6]) :

SCOOT ([10], Split Cycle Offset Optimisation Technique) un système de contrôle à la fois réactif et adaptatif et entièrement centralisé, développé par le TRL (Trafic research laboratory, un centre de recherche anglais sur les transports). Dans ce système, l'ensemble des informations recueillies sur le terrain vont à un centre de gestion, qui s'occupe de traiter les informations et renvoyer des indications directement aux intersections. Les véhicules sont détectés par des dispositifs pouvant être placés à divers endroits sur les voies : au niveau des feux ou à une certaine distance afin de pouvoir mesurer le débit du trafic.

SCOOT mesure en permanence le volume de véhicules de chaque côté de l'intersection et change la durée des phases en fonction d'un indice de performance, calculé par rapport au délai d'attente moyen, de la longueur des files d'attente et des arrêts sur le réseau. Ainsi, de la même manière que TRANSYT ([5]), système sur lequel il est basé, SCOOT génère des plans de feux en fonction de la demande des utilisateurs (côté adaptatif). En plus de cela, le système utilise des informations en ligne issues de bases de données (historique ou autres, côté réactif).

SCATS ([2], Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) qui a été à l'origine développé pour Sydney et d'autres villes Australiennes. Il est pour sa part entièrement

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

Selon [27], l'installation de l'une de ces solutions prendrait en moyenne 365 heures (630h pour SCOOT), coûterait au total en moyenne 55.000\$ par intersection, et nécessiterait un temps d'entraînement moyen de 41 heures (dont 60h pour SCATS).

Tandis que SCATS et SCOOT sont conçus afin de ne prendre qu'une décision par cycle, d'autres systèmes plus modernes tels que OPAC ([28]), RHODES ([20]) ou encore InSync ([8]) analysent le trafic en temps réel et prennent des décisions seconde après seconde afin d'adapter dynamiquement un cycle. Nous pouvons également citer CRONOS ([14]) et Prodyn ([17]), les deux principaux systèmes agissant sur les carrefours Français ([25]). Le premier a été mis au point au début des années 1990 par l'INRETS et permet de dynamiser un carrefour en se basant notamment sur des images en temps réel en provenance de caméras, qui fournissent des informations telles que l'occupation de la chaussée. Le deuxième a été développé par le CERT et a la particularité de se baser sur des mécanismes classiques de cycles et phases.

De nombreux autres systèmes de ce type existent, nous n'avons cité que les principaux. Ces solutions "classiques" régissent à elles seules une bonne partie de ce qu'il peut exister en termes de gestion du trafic routier de manière complète et dynamique. Hélas, leur coût et leur durée d'installation constituent un frein à leur développement.

2.5 Outils théoriques

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

théorique sont étudiés, répandus dans la littérature et servant de base à certains modèles étudiés.

2.5.1 Contrôle par logique floue

La logique floue permet de mettre en place des degrés dans la vérification d'une condition, et non plus se borner à un choix strictement binaire. Ce principe est utilisé par quelques auteurs pour traiter le problème de la gestion des feux de circulation et permet de simplifier le problème, ce qui change des méthodes d'optimisation mathématique habituelles souvent lourdes.

Un exemple de travail peut être trouvé dans [7]. Nous pouvons également citer [40] qui utilise la logique floue afin de déterminer le temps d'un feu en fonction du nombre de véhicules présents sur les voies : à un nombre de véhicules correspond un intervalle définissant une durée de feu (exemple : moins de 5 véhicules par minute donne le feu vert pendant 10 secondes). Ce principe apparaît comme idéal à utiliser :

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

Les inconvénients sont tout de mêmes importants ([26]) : 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.

2.5.2 Algorithmes génétiques

Beaucoup de problèmes sont difficilement solubles exactement. La difficulté ne vient pas de la complexité du problème mais de la taille excessive de l'espace des solutions. Il est alors évident de pouvoir les tester toutes pour trouver la meilleure. C'est pourquoi, des heuristiques approchées ont été essayées pour la résolution de tout un tas de problèmes où la recherche systématique n'est pas possible. Ces heuristiques doivent être peu coûteuses en temps machine et doivent permettre de trouver une solution pas trop mauvaise qui justifie leur utilisation à la place d'une recherche par Monte-Carlo (hasard quadrillé) ou par toute autre méthode. Ainsi sont nés beaucoup d'algorithmes comme les algorithmes génétiques.

L'algorithme génétique ne fait que transposer ce que fait la nature à des systèmes artificiels. Il simule les processus évolutifs Darwiniens et génétiques s'appliquant aux chromosomes.

Il transforme un ensemble d'objets mathématiques, une population d'individus souvent représentés par des chaînes de caractères pour imiter les chaînes d'ADN, chacun ayant une valeur d'adaptation, en une nouvelle population. L'algorithme fait donc appel à quatre opérateurs de base :

- L'évaluation du niveau d'adaptation d'un individu.
- La sélection : c'est le choix des individus en fonction du niveau d'adaptation.
- Le croisement : c'est le mélange des bagages génétiques.
- La mutation : le bagage génétique est modifié abruptement.

Les auteurs de [39] ou encore [36] ont proposé d'optimiser le temps à une ou plusieurs intersections en se basant sur un algorithme génétique. Le principe est le suivant : obtenir une solution approchée d'un problème d'optimisation lorsqu'il n'existe pas de méthode exacte afin de le résoudre en un temps raisonnable. Dans ce type d'algorithme, la solution est approchée par bonds successifs (mutations). Ainsi, en ayant connaissance du nombre de véhicules et du temps moyen d'attente à une intersection, l'algorithme va pouvoir appliquer des méthodes d'optimisation et les améliorer au fil de sa vie. Si l'idée paraît intéressante, les contraintes sont évidentes pour le cas du trafic routier :

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

2.5.3 Réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont composés d'éléments simples (ou neurones) fonctionnant en parallèle. Ces éléments ont été fortement inspirés du système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau (de neurone) est fortement influencé par la connections des éléments entre eux. On peut entraîner un réseau de neurone pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères par exemple) en ajustant les valeurs des connections (ou poids) entre les éléments (neurone). En général, l'apprentissage des réseaux de neurones est effectué de sorte que pour une entrée particulière présentée au réseau corresponde une cible spécifique. L'ajustement des poids se fait par comparaison entre la réponse du réseau (ou sortie) et la cible, jusqu'à ce que la sortie corresponde. L'apprentissage " par paquet " du réseau consiste à ajuster les poids et biais en présentant les vecteurs d'entrée/sortie de tout le jeu de données.

L'apprentissage " pas à pas ou séquentiel " consiste à ajuster les poids et biais en présentant les composantes du vecteur d'entrée/sortie les unes après les autres. Ce type d'apprentissage est souvent qualifié d'apprentissage " en ligne " ou " adaptatif ".

L'apprentissage permet aux réseaux de neurones de réaliser des tâches complexes dans différents types d'application (classification, identification, reconnaissance de caractères, de la voix, vision, système de contrôle).

Ces réseaux de neurones peuvent souvent apporter une solution simple à des problèmes encore trop complexes ne pouvant être résolus rapidement par les ordinateurs actuels (puissance de calcul insuffisante) ou par notre manque de connaissances. La méthode d'apprentissage dite superviser est souvent utilisée mais des techniques d'apprentissage non supervisé existent pour des réseaux de neurones spécifiques. Ces réseaux peuvent, par exemple, identifier des groupes de données (réseaux de Hopfield).

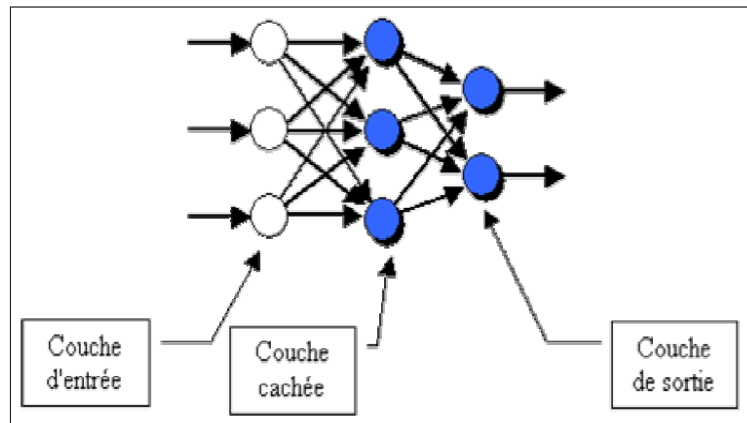


FIGURE 2.1 – Réseau " ordonné " sans connexion arrière (réseau feed-forward)

Dans le cas du trafic routier, plusieurs auteurs se sont penchés sur ce schéma (exemples : [30, 16]). Ici, il est question d'effectuer rapidement des classifications, et d'apprendre à les améliorer, plutôt que de passer par un schéma traditionnel de modélisation. La logique floue et les algorithmes génétiques peuvent être vus comme des compléments aux réseaux de neurones ([37]).

2.5.4 Théorie des files d'attente

Les origines de la théorie de files d'attente remontent à 1990, lorsque A.K.Erlang en a posé les bases dans ses recherches sur le trafic téléphonique. Elle fait actuellement l'objet de nombreuses publications scientifiques. Plusieurs auteurs ont utilisé la théorie de files

d'attente dans différents domaines, par exemple dans [32] ont utilisé cette théorie pour analyser les performances des réseaux en général.

La théorie des files d'attente est particulièrement adaptée au cas de la gestion du trafic routier [21]. Dans le cas des intersections, une file d'attente est automatiquement créée lorsque les véhicules (clients) souhaitent obtenir un feu au vert (serveur). Particulièrement, il est facile avec cette théorie de calculer des valeurs telles que le nombre moyen de véhicules en attente, en service, le temps moyen d'attente ou encore de séjour dans le système.

Une file d'attente est un système stochastique composé d'un certain nombre (fini ou non) de place d'attente d'un ou plusieurs serveurs et bien sûr de clients qui arrivent, attendent, se font servir selon des règles de priorité données et quittent le système .

Le système $M/M/1$

L'analyse théorique d'un modèle de files d'attente a pour objet de saisir qualitativement et quantitativement le fonctionnement du système en question. Pour cela, il faut définir les critères et les mesures susceptibles d'atteindre cet objectif afin d'être capable de déterminer à l'avance les performances du système, les effets d'un changement ou encore d'identifier les paramètres les plus sensibles.

Considérons un système formé d'une file d'attente de capacité infinie et d'un unique serveur, la discipline de cette file est FIFO. Cette dernière modélise un guichet unique où chaque clients reçoit un service dont la durée est une variable exponentielle de paramètre μ , et le processus d'arrivée des clients dans la file est un processus de Poisson de taux λ (Le nombre de clients $A(t)$ arrivant pendant un intervalle de temps $[0, t]$ suit une distribution de Poisson). Ce système est connu sous le nom de file $M/M/1$.

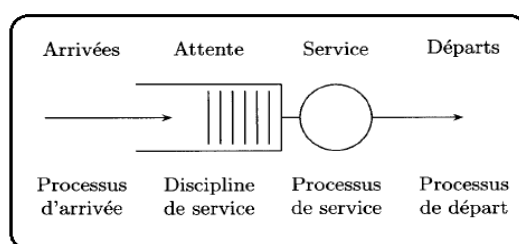


FIGURE 2.2 – File d'attente simple

Mesures de performances :

Pour un système composé d'une seule file d'attente, les principales mesures de performances sont :

- $P[A(t) = k] = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^k}{k!}$, $k = 0, 1, 2, \dots$
- La durée des interarrivées T sont exponentiellement distribuées de fonction de densité :

$$a(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \forall t > 0$$

- Les durées de service S sont exponentiellement distribuées de fonction de densité :

$$b(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad \forall t > 0$$

- Le nombre moyen de clients dans le système :

$$\begin{aligned} N = E[X] &= \sum_{K=0}^{\infty} K \pi_K^* \\ &= \rho(1 - \rho) \sum_{K=1}^{\infty} K \rho^{K-1} \\ &= \frac{\rho}{1 - \rho} \end{aligned}$$

. Où

$\pi_K^* = (1 - \rho)\rho^K$, $K = 0, 1, \dots$ est la distribution stationnaire pour une file stable.

- Le taux d'occupation des serveurs :

$$U = P[X > 0] = 1 - P[X = 0] = 1 - \pi_0^* = \rho$$

- Le nombre moyen de clients en attente :

$$Q = N - U = \frac{\rho}{1 - \rho} - \rho = \frac{\rho^2}{1 - \rho}$$

- Le temps d'attente d'un client :

$$W = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

- Le temps de séjour dans le système :

$$T = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}$$

De manière générale, une file est stable si et seulement si le nombre moyen des arrivées de clients par unité de temps, noté λ , est inférieur au nombre moyen de clients pouvant être servis par unité de temps. Si chaque serveur peut traiter μ clients par unité de temps, une file est stable si et seulement si

$$\lambda < \mu \iff \rho = \frac{\lambda}{\mu} < 1$$

.

Les formules de Little

La théorie des files d'attente a comme objectif d'étudier les structures et de calculer les valeurs caractéristiques permettant de décrire les performances d'un tel système, pour cela Little a construit les formules suivantes :

$$N = \lambda T \tag{2.7}$$

$$Q = \lambda W \tag{2.8}$$

Tel que :

- N : Nombre moyen de clients dans le système de file d'attente.
- Q : Nombre moyen de clients dans la file d'attente.
- T : Temps moyen de séjour d'un client dans la file.
- W : Temps moyen d'attente d'un client dans la file.
- λ : Taux des arrivées dans le système.

2.5.5 Réseaux de files d'attente

La modélisation d'un système à l'aide d'une seule file d'attente n'offre qu'un champ d'application restreint. Bien souvent, un client a besoin de recevoir plusieurs traitements consécutifs et de différentes natures avant de quitter un système.

Les réseaux de files d'attente permettent de modéliser de telles situations et correspondent à des systèmes composés de plusieurs files d'attentes reliées entre elles. Lorsqu'un client quitte

une file, il peut se diriger vers une nouvelle station du réseau ou sortir définitivement du système. Ces décisions sont dictées par des règles de routage qui peuvent être déterministes ou stochastiques.

Un réseau de files d'attente est simplement un système composé d'une ou plusieurs files d'attente reliées entre elles. Les clients (dans les cas les plus simples, tous "identiques") une fois leur service terminé dans une station (file), se déplacent vers une autre station ou quittent le système selon des règles de routage.

Les caractéristiques d'un réseau de files d'attente

Un réseau de files d'attente est caractérisé par[34] :

- **Le chemin suivi par les clients dans le système** : ce chemin peut être soit statique (chaque client va de serveur en serveur suivant une route prédéterminée), soit dynamique (après le service dans une station, le client a le choix entre plusieurs autres stations pour poursuivre son traitement. Ce choix est éventuellement pondéré par les fonctions de probabilité).
- **Les classes de clients** : plusieurs classes de clients peuvent être présentes dans le système. Tous les clients appartenant à une même classe suivront le même chemin. Par contre, à l'intérieur de la station, les différentes classes restent en compétition pour recevoir leur traitement.

Les différents types de réseaux

Principalement, on distingue quatre types de réseaux :

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

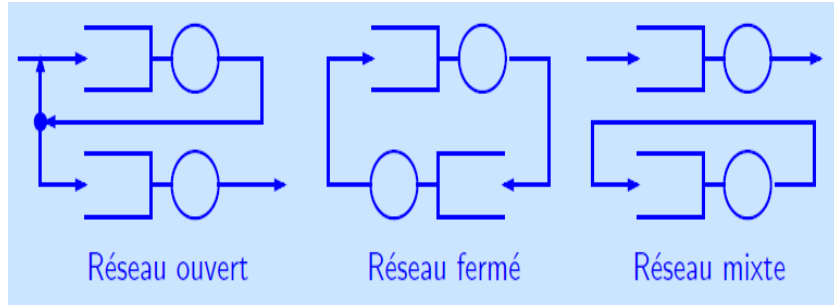


FIGURE 2.3 – Trois exemples de réseaux de files d'attente (ouvert, fermé, et mixte)

Réseaux à forme produit

La définition la plus simple de l'état d'un réseau consiste à définir l'état $x(t)$ du système au temps t comme le vecteur $(x_1(t) \dots x_J(t))$ où $x_j(t)$ est le nombre de clients présents à l'instant t dans la file j . Sous certaines conditions, un réseau stable possède une distribution stationnaire π^* de la forme

$$\pi^*(x) = \pi^*(x_1(t) \dots x_J(t)) = \prod_{j=1}^J \pi_j^*(x_j)$$

Un tel réseau est dit à forme produit et se comporte comme J files indépendantes de distribution stationnaire $\pi_j^*, j = \overline{1, J}$

Routage des clients [32]

Lorsqu'un client termine son service à une station, il faut préciser où ce client va se rendre : soit à une autre station, soit à l'extérieur (le client quitte alors le réseau).

A nouveau, le routage des clients est très souvent caractérisé de façon probabiliste. Soit P_{ij} la probabilité pour qu'un client qui quitte la station i se rende à la station j et soit P_{i0} la probabilité pour qu'un client qui quitte la station i quitte le système. Les P_{ij} sont tels que : $\sum_{j=0}^M P_{ij} = 1$

Il existe cependant d'autre type de routage :

- Le routage vers la file la plus courte (routage dynamique) : un client quittant une station choisira parmi toutes les destinations possibles, la station qui comporte le moins de clients.
- Le routage cyclique (routage déterministe) : les clients quittant une station choisiront à tour de rôle chacune des stations parmi toutes les destinations possibles.

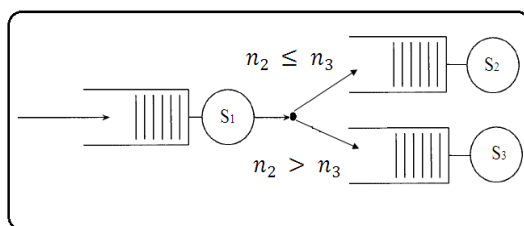


FIGURE 2.4 – Routage vers la file la plus courte

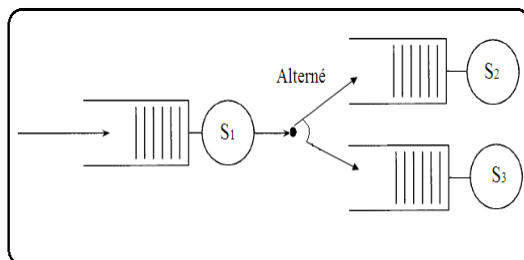


FIGURE 2.5 – Routage cyclique

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les STI qui sont conçus pour la régulation de la congestion routière et la gestion du trafic routier en général, ainsi que les outils théoriques qui sont utilisés pour la modélisation du trafic routier. Nous avons, en particulier, mis l'accent sur la théorie des files d'attente que nous avons utilisée pour modéliser notre système.

Modélisation du trafic urbain à base de réseau de capteurs sans fil

3.1 Introduction

Les réseaux de capteurs sans fil sont un cas particulier des réseaux ad-hoc, ces derniers possèdent typiquement des contraintes supplémentaires, les rendant massivement accessibles et à faible coût. De tels capteurs représentent une solution idéale dans le cas de la gestion du trafic routier, ceci en comparaison avec les équipements traditionnels : par exemple, ces dispositifs sont plus efficaces que les boucles électromagnétiques, de part de leur réactivité, facilité de mise en place et nombre de points de mesure.

Dans notre cas, on pense immédiatement à une interface avec les contrôleurs de feux. Tout d'abord, nous détaillons les principes de fonctionnement des capteurs électromagnétiques (la manière dont ces derniers peuvent détecter des véhicules), ensuite, nous modélisons le système à étudier, constitué des trois intersections de la ville de Béjaia (Tobal, Naciria, et Aurès).

3.2 Principe de fonctionnement

Les capteurs électromagnétiques se comportent de manière similaire aux boucles du même nom : lorsqu'un large objet métallique (véhicule) passe par-dessus d'un capteur, ce dernier enregistre les variations produites sur le champ magnétique terrestre. Ces variations permettent de détecter un véhicule, de connaître son type (en fonction de l'intensité des variations), de mesurer sa vitesse ou encore sa longueur (estimées ou avec deux capteurs

séparés d'une distance connue).

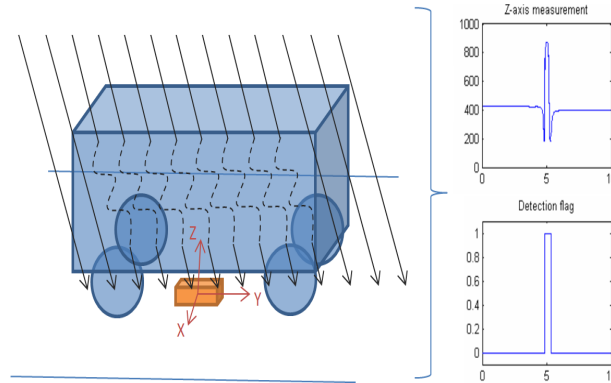


FIGURE 3.1 – Détection d'un véhicule par un capteur électromagnétique

3.2.1 Présentation du système

Nous avons choisi de nous pencher sur le cas d'un chemin allant de Tobal (source) vers les Aurès, passant par le carrefour de Naciria (la position de ces trois intersections sur la carte se trouve dans l'annexe). Le carrefour de Naciria sis au Nord-Ouest de la ville de Bejaia, est un carrefour giratoire à quatre voies, représentant l'un des principaux points d'échange et de distribution du centre ville. Naciria est situé à l'intersection entre Sidi Ahmed, Amriw, la Wilaya et les Aurès. Tobal est situé à l'intersection entre le centre ville, cité Tobal et la Wilaya, elle est composée de trois voies. Les Aurès est situé à l'intersection entre Ihaddaden, Aurès et Carrefour de Naciria, elle est composée de trois voies aussi.

La congestion du chemin pendant l'heure de pointe est due :

- ↔ Au point d'accès aux zones importantes de la ville de Bejaia, centre ville, Amriw, les Aurès, Sidi Ahmed, Ihaddaden, et Tobal.
- ↔ A l'insuffisance de la signalisation horizontale et verticale.
- ↔ A la présence d'arrêts de bus anarchiques à la sortie du carrefour.

Cette congestion nécessite la prise en charge de ce problème. Un cahier des charges à été déposé par le Bureau d'Etude de Transport Urbain et de Réhabilitation (BETUR) en 2012 (voir l'annexe). Cette étude est faite pour mettre en place un plan de circulation.

3.3 Modélisation du système à base des RCSFs

Dans cette partie, nous allons étudier l'utilisation des capteurs électromagnétiques en milieu urbain, notamment pour la gestion des intersections et des feux de circulation. Cette étude est décomposée suivant les différentes infrastructures sur lesquelles le modèle de plusieurs intersections se base. On suppose qu'on a trois intersections, chaque intersection possède un système de feu de signalisation (un feu pour chaque voie). Des capteurs sont placés sur chaque voie avant le feu de signalisation. Ces derniers sont chargés de détecter et compter les véhicules, puis relayer ces informations détectées à la station de base (SB) périodiquement pour qu'elle fasse la gestion des feux de signalisation.

La conception de RCSF est utilisée comme infrastructure de communication dans le contrôleur des feux, pour que les composants du système (capteurs, boîte de contrôle de la circulation et la station de base) soient en mesure de communiquer en utilisant l'algorithme de communication TSCA (Traffic System Communication Algorithm).

Le processus de gestion des feux se fonctionne comme suit :

- Les données seront collectées à l'aide des capteurs ;
- Faire une communication entre les capteurs et la station de base, en appliquant l'algorithme TSCA ;
- Gérer les durées de feux de signalisation (dans la section suivante on va parler largement sur cette étape "Processus de service") ;
- Une communication entre une intersection avec les intersections environnantes est nécessaire afin d'échanger les informations sur le trafic retenu à ces dernières.

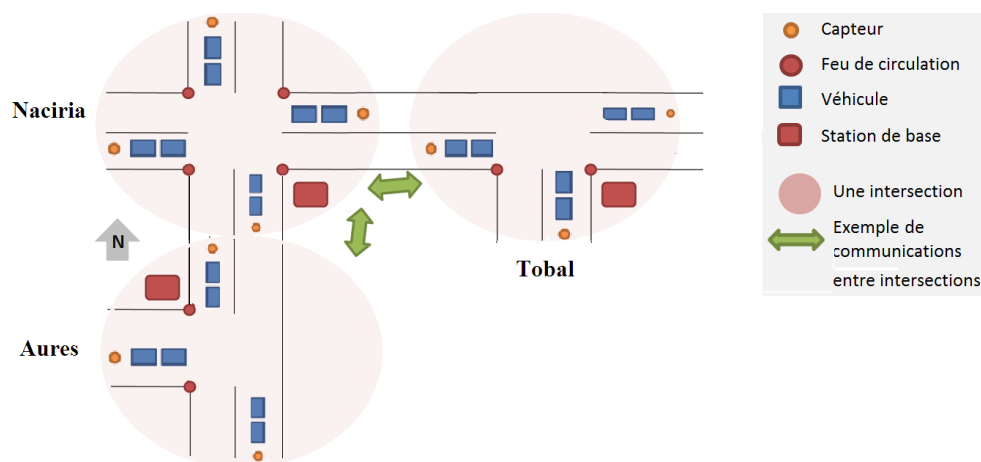


FIGURE 3.2 – Emplacement des capteurs dans les trois intersections

3.3.1 Algorithme de contrôle du trafic pour une seule intersection

L'algorithme TSCA de communication, proposé par Yousef et Al. [21], est conçu pour trouver et contrôler les voies de communication d'une manière efficace entre tous les composants de gestion de l'intersection (capteurs, feux de circulation et la SB). Cet Algorithme utilise un système de routage direct où tous les capteurs sont distribués pour être dans la plage de la SB. En fonction du nombre de ces capteurs, le fonctionnement du système est divisé en tranches de temps, dans lequel chaque capteur opère selon TDMA (Time division Multiple Access).

Les informations de trafic collectées et agrégées par la SB sont ensuite transmises au prochain algorithme pour régler les durées de temps pratiques des feux de circulation de manière dynamique selon les chiffres de véhicules sur chaque signal du trafic. Après cela, la boîte de contrôle de la circulation applique les créneaux horaires de retour de réglage sur les feux de circulation.

Algorithme TSCA

Entrée : N , λ_i , μ_i , et Q_i , $i = 1 \dots N$

Où :

- N : le nombre de voies dans une intersection.
- λ_i : le taux d'arrivée de la voie i .
- μ_i : le taux de service de la voie i .
- Q_i : le nombre moyen de véhicules dans la voie i .

Sortie : garantir la réussite de la communication entre tous les composants du système de commande de trafic afin de régler les durées de temps pour les signaux de circulation en utilisant l'appareil de commande du trafic.

Opérations :

1. La SB qui est en cours d'exécution définit la période d'écoute (L) de capteurs.
2. La SB envoie un "message d'exploitation" en utilisant l'option Turn-ON à tous les capteurs pour les mettre dans le mode de communication.
3. Chaque capteur s'identifie comme étant soit une détection d'arrivée de véhicule ou une détection de départ de véhicule.
4. Chaque capteur sélectionne au hasard un intervalle de temps au sein de " L " pour envoyer son état de la circulation (λ_i , μ_i , et Q_i) à la SB.
5. La SB applique l'algorithme de gestion des feux de circulation, qui renvoie les durées de direction des différents feux de signalisation.

6. La SB fixe les durées dynamiques obtenues sur les feux de circulation à l'aide de la boîte de contrôle de la circulation.

3.3.1.1 Modélisation du système étudié par un réseau de files d'attente

Le principe de base est de placer dans chaque voie un capteur qui détecte l'arrivée d'un véhicule, et ensuite envoie les informations concernant sa voie à la station de base de cette intersection. Ainsi, des véhicules arrivent dans le système et attendent pour être servis (quitter le système).

- Si le véhicule arrive pendant la phase verte, alors il est servi.
- Sinon, il attend la fin du cycle actuel.

Il est à noter que la partie la plus importante dans la conception du modèle est la coordination des paramètres de trafic et les conditions sur les intersections multiples en général, avec l'objectif de gérer le temps des feux de circulation permettant à un flux d'usagers de traverser un ensemble d'intersections en minimisant la durée d'attente. L'ensemble des intersections constitue un ensemble de nœuds interagissant les uns avec les autres.

Chaque voie représente une phase dans un cycle. Le modèle exécuté sur chaque intersection génère des informations de trafic, qui à son tour représente une entrée à l'intersection subséquente, et ainsi de suite. Donc on parle d'un réseau de file d'attente ouvert.

La première étape est de régler la structure des intersections sous contrôle ainsi que les différents initialisations (les arrivées, les départs, ...).

Dans ce qui suit on s'intéresse à la détermination des paramètres du réseau de files d'attente. Il s'agit de définir le processus de service (la loi de service des véhicules et la durée d'activation des feux de signalisation), les probabilités de routage et le processus d'arrivée (les lois et les taux d'arrivées).

A. Processus de service :

La sélection des phases des feux de circulation est l'une des étapes importantes dans ce modèle, cette sélection est dynamique car elle est basée sur les longueurs des files d'attente, et elle est effectuée à chaque phase, donc il n'y a pas d'ordre fixe de phases.

Logiquement la plus grande file possède le temps d'attente le plus grand, notre but est de servir le maximum de véhicules dans cette file. Le temps nécessaire pour vider cette dernière est la somme des temps de services des véhicules à l'instant t .

Soient :

- y_i le temps de service du $i^{ème}$ véhicule.
- $Y = \sum_{i=1}^n y_i$ le temps de service de n véhicules.

Sachant que $y_i \rightsquigarrow \exp(\mu)$, alors $Y \rightsquigarrow \text{gamma}(n, \mu)$ de fonction de répartition.

$$F(t) = \int_0^t \frac{\mu(\mu.x)^n}{n!} e^{-\mu x} dx \quad (3.1)$$

Et sa fonction de densité est :

$$f(t) = \frac{\mu(\mu.x)^n}{n!} e^{-\mu t} \quad (3.2)$$

Le temps moyen de service de n véhicules est $E(Y) = \int_0^\infty t.f(t)dt = n.\mu$.

Le temps de feu vert V est : $V = \min(V_s^k, V_{max}^k)$

Où :

V_s^k : le temps de service nécessaire pour vider la file pour le cycle k ,

V_{max}^k : Le temps du feu vert maximum pour le cycle k ,

On suppose que la voie la plus grande est en feu vert, les autres sont en feu rouge, alors on initialise la durée de feu vert à $\frac{T}{4}$, la durée de feu rouge à $T - \frac{T}{4} = \frac{3T}{4}$, et toutes les files à 0, où T représente la durée d'un cycle.

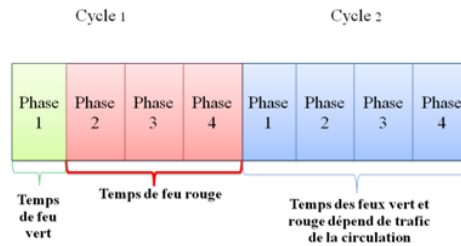


FIGURE 3.3 – Présentation d'un cycle avec successions de 4 phases

A l'aide de la formule du Little $Q = \frac{\rho^2}{1-\rho}$, on calcule les longueurs des files d'attente, ensuite on fait une comparaison entre ces derniers pour choisir la plus grande. La durée du feu vert de la plus grande, est calculée de la manière suivante :

$$V_{P,K} = \frac{\max_K}{\max_1 + \max_2 + \max_3 + \max_4} T, \quad (3.3)$$

$$R_K = T - V_K. \quad (3.4)$$

Où

V_K représente le temps de feu vert pour le cycle K, R_K représente le temps de feu rouge pour le cycle k, et max_K représente la plus grande file pour le cycle k. Donc le feu vert est :

$$V_k = \min \left\{ \begin{array}{l} E(Y) \\ V_{P,K} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

A chaque fois que la durée du feu vert est terminée, les files sont mises à jour. En effet, la longueur de la file actuelle est égale à la longueur de la précédente, en additionnant le nombre de véhicules arrivant pendant la durée du feu rouge, et les véhicules qui sont arrivés pendant la durée du feu vert, moins le nombre de véhicules servis. Cette mise à jour est traduite par l'équation suivante :

$$Q_{F_i} = Q_{F_{i-1}} + \lambda_V V - \mu_V V + \lambda_R R, \text{ pour } i = \overline{1,4} \quad (3.6)$$

Remarque

Si la file est vide, alors on met le temps de feu vert à zéro ($V=0$) et on active le feu rouge.

B. 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 suivantes :

1. *Voie 1* : représente les flux en provenance de Sidi Ahmed sur un trafic global de près de 2072 véhicules : 37.114% à destination des Aurès, 44.884% à destination de la wilaya, et 18.002% à destination d'Amriw.
2. *Voie 2* : représente les flux en provenance d'Amriw sur un trafic global de près de 2563 véhicules : 39,80% à destination de la wilaya, 13,42% à destination de Sidi Ahmed, et 46,78% à destination des Aurès.
3. *Voie 3* : représente les flux en provenance de la rue BOUDECHICHA Taher sur un trafic global de près de 1038 véhicules : 27,55% à destination de Naciria, et 72,45% à destination de Ihaddaden.

4. *Voie 4* : représente les flux en provenance de Ihaddaden sur un trafic global de près de 2065 véhicules : 27,51% à destination de Naciria, et 72,49% à destination de rue BOUDECHICHA Taher.
5. *Voie 5* : représente les flux en provenance de la cité Tobal sur un trafic global de près de 2466 véhicules : 53,89% à destination de Naciria, et 46,11% à destination de centre ville.
6. *Voie 6* : représente les flux en provenance du centre ville sur un trafic global de près de 2309 véhicules : 57,38% à destination de Naciria, et 42,62% à destination de cité Tobal.
7. *Voie 7* : représente les flux en provenance des Aurès sur un trafic global de près de 1913 véhicules : 39,62% à destination de la wilaya, 45,79% à destination d'Amriw, et 14,58% à destination de Sidi Ahmed.
8. *Voie 8* : représente les flux en provenance de la Wilaya sur un trafic global de près de 2453 véhicules : 64,90% à destination d'Amriw, 0,57% à destination de Sidi Ahmed, et 34,53% à destination des Aurès.
9. *Voie 9* : représente les flux en provenance du Naciria sur un trafic global de près de 1644 véhicules : 84,98% à destination de Ihaddaden, et 15,02% à destination de rue BOUDECHICHA Taher.
10. *Voie 10* : représente les flux en provenance du Naciria sur un trafic global de près de 2383 véhicules : 56,95% à destination de centre ville, et 43,05% à destination de cité Tobal.

C. Processus d'arrivée des véhicules :

Les données dont nous disposons sont le nombre d'arrivées par voie, par destination et par quart d'heure. Ces données sont résumées par les variables suivantes :

A_i représente le nombre d'arrivées par quart d'heure pour la $i^{ème}$ voie, $i = \overline{1,4}$. Le traitement statistique appliqué aux données permet la détermination des lois des arrivées pour chaque destination de chaque voie. Pour cela, on a eu recours au test d'ajustement Kolmogorov-Smirnov.

L'ajustement des lois des arrivées par des lois théoriques s'est fait grâce au logiciel statistique R (voir l'annexe). Ce logiciel nous 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 " $A_i \longrightarrow Poisson(\lambda_i)$ "

contre H_1 " $A_i \rightarrow \text{Poisson}(\lambda_i)$ " .

Le risque d'erreur lors de la prise de décision est fixé à un seuil de confiance de 5%. Les résultats obtenus en utilisant l'outil R pour chaque destination de chaque voie sont :

1. *Voie 1* : les arrivées de Sidi Ahmed au carrefour sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations, la wilaya, les Aurès, et Amriw sont 0.2816, 0.1774, et 0.1905 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457. Donc l'échantillon prélevé nous permet d'accepter l'hypothèse H_0 , (c-à-d les arrivées sont poissonniennes et cela au niveau de 5%).

$$\hat{\lambda}_{St} = 0.29 \text{ véhicules/seconde}$$

2. *Voie 2* : les arrivées d'Amriw au carrefour sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations, la wilaya, Sidi Ahmed, et les Aurès sont 0.2065, 0.2234, et 0.1729 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457.

$$\hat{\lambda}_{Rt} = 0.36 \text{ véhicules/seconde}$$

3. *Voie 3* : Les arrivées de la rue BOUDECHICHA Taher sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations Naciria et Ihaddaden sont 0.2771, et 0.1176 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457.

$$\hat{\lambda}_{Bt} = 0,14 \text{ véhicules/seconde}$$

4. *Voie 4* : Les arrivées de Ihaddaden sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations Naciria, et la rue BOUDECHICHA Taher sont 0.2443, et 0.2231 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457.

$$\hat{\lambda}_{It} = 0,29 \text{ véhicules/seconde}$$

5. *Voie 5* : Les arrivées de cité Tobal sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations centre ville

et Naciria sont 0.221, et 0.1898 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457.

$$\hat{\lambda}_{Tt} = 0,34 \text{ véhicules/seconde}$$

6. *Voie 6* : Les arrivées du centre ville à l'intersection sont poissonniennes. En effet, les valeurs des statistiques de Kolmogorov-Smirnov calculées pour les destinations Naciria et la cité Tobal sont 0.2439, et 0.1978 respectivement. Elles sont toutes inférieures à la valeur tabulée à un seuil de confiance de 5% qui est 0.457.

$$\hat{\lambda}_{Ct} = 0,32 \text{ véhicules/seconde}$$

Les arrivées de chaque intersection sont poissonniennes, en vertu de la propriété de superposition de processus de Poisson (4.8) de l'annexe. Elles dépendent des départs des intersections voisines. En effet :

- *Voie 7* : Les arrivées des Aurès à l'intersection de Naciria sont poissonniennes.
 $\hat{\lambda}_{At} = P_{IN}\hat{\lambda}_{It} + P_{BN}\hat{\lambda}_{Bt}$
 $\hat{\lambda}_{At} = 0.12 \text{ véh/s.}$
- *Voie 8* : Les arrivées de la Wilaya à l'intersection de Naciria sont poissonniennes.
 $\hat{\lambda}_{Wt} = P_{CW}\hat{\lambda}_{Ct} + P_{TW}\hat{\lambda}_{Tt}$
 $\hat{\lambda}_{Wt} = 0.36 \text{ véh/s.}$
- *Voie 9* : Les arrivées du carrefour de Naciria à l'intersection des Aurès sont poissonniennes.
 $\hat{\lambda}_{Nt} = P_{SA}\hat{\lambda}_{St} + P_{RA}\hat{\lambda}_{Rt} + P_{WA}\hat{\lambda}_{Wt}$
 $\hat{\lambda}_{Nt} = 0.39 \text{ véh/s.}$
- *Voie 10* : Les arrivées du carrefour de Naciria à l'intersection de la cité Tobal sont poissonniennes.
 $\hat{\lambda}_{Nat} = P_{SW}\hat{\lambda}_{St} + P_{RW}\hat{\lambda}_{Rt} + P_{AW}\hat{\lambda}_{At}$
 $\hat{\lambda}_{Nat} = 0.38 \text{ véh/s.}$

Lors de l'arrivée au carrefour, les véhicules demandent un service. Si l'état du feu est vert, ils quittent le carrefour. Dans le cas contraire, ils seront bloqués dans une

file d'attente.

À chaque réalisation d'un événement, l'état du carrefour change. En effet, les arrivées des véhicules sont interrompues, tandis que leurs départs sont conditionnés par l'état du feu.

A l'issu de cette étude, nous concluons que le réseau de files d'attente correspond est complètement défini, où les arrivées sont poissonniennes et les services sont exponentiels.

Le réseau de files d'attente correspondant est représenté sur la figure (3.4) :

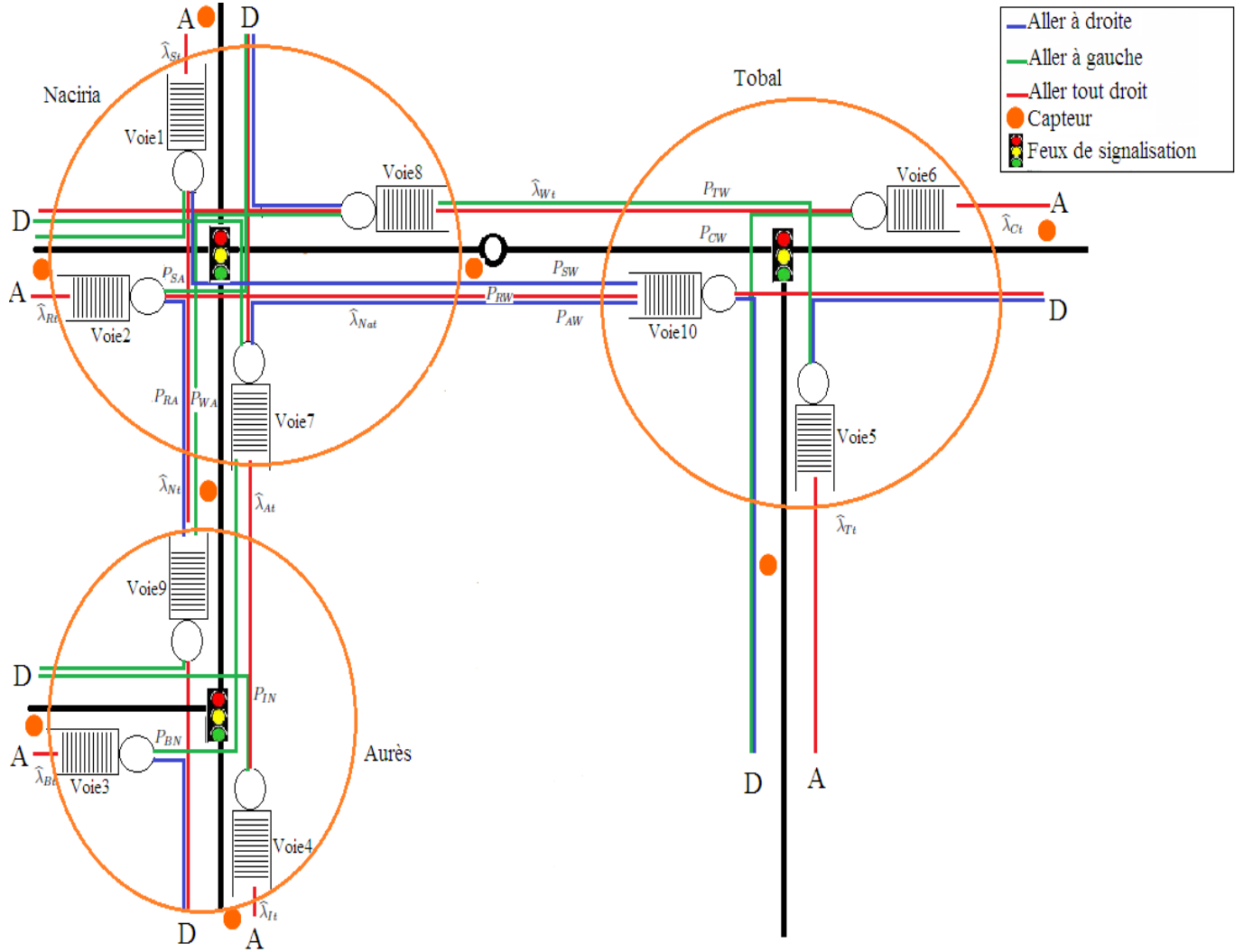


FIGURE 3.4 – Modèle de réseau de files d'attente des trois intersections

L'évolution du système est directement liée à la nature de l'événement qui se produit. Alors, le système est géré événement par événement. Il apparaît clairement que notre modèle est discret aléatoire, ce qui justifie notre recours à un modèle de simulation à événement discret.

3.4 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 ce chapitre, nous nous sommes penchés sur le couplage de réseau de capteurs avec les feux de signalisation, prenons le cas de trois intersections de la ville de Béjaia. Ensuite, nous avons modélisé le système par le réseau de file d'attente. ce qui a conduit à la détermination des probabilités de routage, et au calcul des taux des arrivées de chaque voie.

Simulation des mouvements des véhicules

4.1 Introduction

Le but de ce travail est de mettre en œuvre une application au niveau urbain de la wilaya de Bejaia où il s'agit de gérer les feux de circulation à base des réseaux de capteurs sans fil au niveau du chemin de (Tobal-Aurès) de la ville de Bejaia. Dans ce chapitre, nous simulons par événements discrets le réseau de files d'attente (conçu dans le chapitre 3) correspondant au chemin. L'objectif de cette analyse est d'obtenir les mesures de performance nécessaires pour prouver l'intérêt de l'intégration des RCSFs dans les systèmes de signalisation.

4.2 Définition de la simulation

La simulation est une technique de modélisation du monde réel. Elle permet de représenter le fonctionnement d'un système composé de différents centres d'activités, de mettre en évidence les caractéristiques de ceux-ci et les interactions entre eux, de décrire la circulation des différents objets traités par ces processus et enfin d'observer le comportement du système dans son ensemble et son évolution dans le temps [23].

4.3 Les étapes de la simulation

1. Construction du modèle de simulation ;
2. Implémentation du modèle ;

3. Création des expériences de simulation ;
4. Validation du modèle de simulation ;
5. Exécution du simulateur et analyse de données (data mining).
 - Le modèle sera valide s’il permet à un analyste ou un décideur de prendre, à propos du système donné, les mêmes décisions que celles qu’il aurait prises s’il avait pu procéder à une expérimentation discrète.
 - Les résultats d’études faites par simulation auront d’autant plus de crédibilité s’ils sont présentés indépendamment de la nature aléatoire des lois utilisées et sur une analyse appropriée des résultats de la simulation[23].

4.4 Simulation par événement discrets

La simulation par événements discrets consiste à prendre en compte, dans la modélisation des tâches actives, les seuls instants où un événement se produit et à concentrer l’activité des tâches simulées sur ces instants là.

Dans ce cas, les variables décrivant un état ne changent qu’en un nombre fini de points sur l’axe des temps. Ces points sont les instants où se passent les événements [23]. Pour une station 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.

4.4.1 Simulateurs orientés événements

Les événements sont décrits par deux attributs formant la notice d’événement.

1. L’heure d’activation, c à d l’instant où l’événement est censé se produire, et
2. la procédure d’activation comprenant les actions qui doivent être effectuées à ce moment là.

Heure d’activation
procédure d’activation

Notice d’événement

Le simulateur lui même possède les deux attributs suivants :

- Une horloge centrale ou horloge du système qui donne en tout temps l'heure du système de simulation, qui est en principe l'heure d'activation de l'événement courant.
- Un échéancier, réalisé comme file d'attente avec priorité où les notices d'événements sont rangées par rapport à l'heure d'activation des processus correspondants [23].

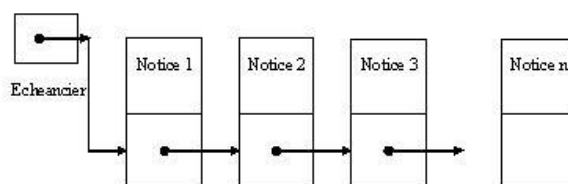


FIGURE 4.1 – Echéancier des événements

4.4.2 Simulation et résultats numériques

Dans le but d'évaluer les performances du système en question, nous avons élaboré un modèle de simulation (à événements discrets) qui peut reproduire le comportement du système correspondant.

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation pour la commande des feux de trois intersections consécutives (Naciria, Tobal, et les Aures). Nous utilisons MATLAB pour simuler le comportement des véhicules. Les paramètres de simulation d'intérêt principaux sont le nombre moyen de véhicules dans la file "Q", et le temps d'attente moyen dans la file "W". Ces mesures sont choisies car elles indiquent les schémas de flux de trafic et leur effet sur la diminution de la congestion du trafic.

Deux styles de contrôle de la circulation sont présentés et comparés, à savoir, le modèle classique dont le contrôle est en temps fixe, et le modèle basé sur le réseau de capteurs.

Résultats de simulation

Après la validation des deux simulateurs (en temps fixe et dynamique), leurs exécutions pour $T=90$ secondes, sur une durée de 9000 secondes (100 cycles).

Avec un $\mu = 0.4$.

	Système de contrôle des feux avec RCSF				Système de contrôle des feux de circulation classique			
	Voie 1	Voie 2	Voie 7	Voie 8	Voie 1	Voie 2	Voie 7	Voie 8
Q	1.2841	1.4922	1.2959	1.0691	8.7025	10.7837	2.9880	10.2797
W	0.3724	0.5372	0.1555	0.3849	2.5237	3.8821	0.3586	3.7007

TABLE 4.1: Résultats de simulation pour l'intersection de Naciria

	Système de contrôle des feux avec RCSF			Système de contrôle des feux de circulation classique		
	Voie 9	Voie 4	Voie 3	Voie 9	Voie 4	Voie 3
Q	1.8674	1.3050	1.4133	10.2492	6.5450	30.851
w	0.7283	0.3784	0.1979	3.9972	1.8981	0.4319

TABLE 4.2: Résultats de simulation pour l'intersection des Aurès

	Système de contrôle des feux avec RCSF			Système de contrôle des feux de circulation classique		
	Voie 5	Voie 10	Voie 6	Voie 5	Voie 10	Voie 6
Q	1.8566	2.0431	1.7547	8.0820	8.6100	7.3286
W	0.6313	0.7764	0.5615	2.7479	3.2718	2.3451

TABLE 4.3: Résultats de simulation pour l'intersection de Tobal

Le nombre moyen de véhicules en attente, ainsi que le temps d'attente à chaque seconde sur les quatre voies de Naciria, les trois voies des Aurès, et les trois voies de Tobal sont représentés respectivement dans les tableaux (Tab.4.1), (Tab.4.2),et (Tab.4.3).

Discussions

D'après les résultats obtenus, on remarque que les mesures de performances évaluées (Q , W) sont améliorées d'une manière significative, avec notre approche. En effet :

- Le nombre moyen de véhicules en attente dans la file avec réseau des capteurs est plus petit que dans le système classique. On peut dire donc que les files dans le premier sont non surchargées, ce qui montre que la gestion de trafic avec les capteurs peut s'adapter à des chemins congestionnés afin de fluidifier la circulation.
- Le temps d'attente dans l'ancien modèle est plus grand, ce résultat montre que la nouvelle approche 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 optimale grâce aux capteurs réagissant aux événements en temps réel.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons prouvé l'efficacité de la gestion de trafic urbain basée sur une nouvelle infrastructure routière utilisant les RCSFs. Nous avons simulé le modèle correspondant avec un système de contrôle dynamique (RCSFs) et le modèle correspondant avec un système de trafic classique (sans RCSFs).

Les résultats obtenus à partir de la simulation, nous indiquent clairement que les feux de signalisation munis des capteurs peuvent gérer efficacement le trafic urbain.

Finalement, nous avons prouvé que le système de contrôle dynamique proposé joue un rôle majeur dans la lutte contre le problème de la congestion par rapport à l'inefficacité des systèmes classiques de contrôle du trafic.

Conclusion générale et perspectives

Le développement des STI (Systèmes de Transport Intelligents) pour gérer le trafic routier (en particulier le trafic urbain) est devenu un domaine de recherche d'actualité dans la plupart des pays du monde.

En Europe, le projet PROMETHEUS (PROgram for an European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety) a commencé cette étape exploratoire en 1986. Le projet a impliqué plus de 13 constructeurs automobiles et plusieurs unités de recherches gouvernementales et universitaires de 19 pays européens. Dans ce cadre, un certain nombre d'approches différentes des STI ont été conçues et mises en application.

Aux Etats-Unis, la majeure partie des initiatives a été lancée afin de traiter le problème de la mobilité, impliquant plusieurs universités, centres de recherches et compagnies automobiles. Après cette phase pilote, le gouvernement américain a établi le NAHSC (National Automated Highway System Consortium) en 1995.

Au Japon, où le problème de mobilité est beaucoup plus important, quelques prototypes de véhicules ont été développés dans le cadre de différents projets. A l'instar de ce qui s'est produit aux USA, l'Advanced Cruise-Assist Highway System Research Association (AHSRA) a été fondée en 1996 de manière à impliquer un grand nombre d'industriels de l'automobile et de centres de recherches, qui ont conjointement développé différentes approches relatives à la conduite automatisée de véhicule.

Nous pouvons également citer le projet coopératif international ATLANTIC (A Thematic Long-term Approach to Networking for the Telematics and ITS Community) qui

a débuté en 2001, impliquant plusieurs laboratoires de recherches européens et Nord Américains.

Cependant, en Algérie aucune infrastructure à la base des STI pour la gestion du trafic routier n'a été mise en place.

Notre objectif était de s'attaquer à la problématique de la régulation du trafic urbain afin de satisfaire des objectifs de sécurité, tout en améliorant l'expérience de l'utilisateur par la réduction de la fréquence et de la taille de l'embouteillage. Il s'agit de caractériser, de formaliser et de traiter simultanément ces objectifs a priori antagonistes au travers de modèles et d'algorithmes distribués s'appuyant sur un réseau de capteurs sans fil localisés dans les équipements de signalisation routière auquel peut s'adjoindre un réseau de véhicules communicants.

Dans ce travail, nous avons modélisé un sous réseau routier par un réseau de files d'attente au niveau du chemin allant de Tobal vers les Aurès de la ville de Bejaia. en appliquant la simulation par événements discrets. L'analyse du trafic routier a permis de déterminer les principaux événements influant sur le système (le processus des arrivées, le processus des services et les probabilités de routage). De même, l'analyse statistique appliquée aux données disponibles nous a permis de déterminer les lois des arrivées pour chaque voie des différentes intersections.

Notre étude a prouvé l'efficacité de la gestion de trafic urbain basée sur une nouvelle infrastructure routière utilisant les RCSFs. Nous avons simulé le modèle correspondant avec un système de contrôle dynamique (RCSFs) et le modèle correspondant avec un système de trafic classique (sans RCSFs). Les résultats obtenus à partir de la simulation, nous indiquent clairement que les feux de signalisation munis des capteurs peuvent gérer efficacement le trafic urbain. Ces résultats prouvent que le système de contrôle dynamique proposé joue un rôle majeur dans la lutte contre le problème de la congestion par rapport à l'inefficacité des systèmes classiques de contrôle du trafic.

Les résultats obtenus dans le cadre de ce projet ouvrent de nouvelles perspectives telles que :

- La généralisation de l'approche à un carrefour complexe (prendre comme contraintes la différence entre les types de véhicules, les piétons, les signalisations routières. . .) ;

-
- Élargir l'étude de la congestion au niveau de toute la ville de Bejaia, en analysant plus en détail le trafic durant différentes périodes de l'année, sur le réseau routier.

Bibliographie

- [1] A.GALLAIS. *Ordonnancement d'activité dans les réseaux de capteurs : l'exemple de la couverture de surface*. Université de Lille.Juin 2007.
- [2] Association mondiale de la route / World Road Association. *AIPCR Manuel sur les systèmes de transport intelligents (STI) (seconde édition)*.Anglaise : ISBN 2-84060-174-5 Route 2 Market Ltd. Française : ISBN 2-84060-188-5 AIPCR Secrétariat. Paris, 2003.
- [3] A. WANG AND A. CHANDRAKASAN. *Energy-efficient DSPS for wireless sensor networks*.IEEE Signal and Processing Magazine, pp. 68-78. Juillet 2002.
- [4] B.BAYNAT. *Théorie des files d'attente*. Hermès. Paris, 2000.
- [5] B. M. CHARD and C. J. LINES. Transyt - the latest developments. *Traffic engineering and control*, 28(7-8) :387-390, 1987.
- [6] 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.
- [7] C. LEE. *Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic controller*. Part ii. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 20(2) :419-435. 1990.
- [8] C. REGGIE and G.CHRIS. *Insync adaptive traffic signal technology : Real-time artificial intelligence delivering real-world results*. July 2010.
- [9] D. LI, K. WONG, Y. HU, and A. SAYEED. *Detection, classification, and tracking of targets*. IEEE Signal Processing Magazine, 19(2) :17-30. March 2002.
- [10] D. ROBERTSON and R. BRETHERTON. *Optimizing networks of traffic signals in real time-the scoot method*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40(1) :11 -15. Feb. 1991.

-
- [11] D. W. Dey, S. FITZSIMONS, A. MORRIS, and D. NG. *Adaptive traffic signal interconnect in menlo park and sunnyvale.*, 2002.
- [12] E. BINGHAM. *Reinforcement learning in neurofuzzy traffic signal control*. European Journal of Operational Research, 131(2) :232-241., 2001.
- [13] Equipe de Get 2005 Capt'Ad-hoc. *Sensor networks : State of the art*. Technical Report, Telecom Paris, ENST Br, INT, INRIA. Mars 2006.
- [14] F. BOILLOT, J. BLOSSEVILLE, J. LESORT, V. MOTYKA, M. PAPA-GEORGIOU, and S. SELLA. *Optimal signal control of urban traffic networks*. In 6th International Conference on Road Traffic Monitoring and Control, number 472, pages 182-186., 1992.
- [15] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, and E. I. CAYIRCI. *A survey on sensor networks*. IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 8, pp. 102-116. Août 2002.
- [16] I. F. AKYILDIZ, W. SU, Y. SANKARASUBRAMANIAM, and E. I. CAYIRCI. *Wireless sensor networks : A survey*. IEEE Computer Networks, Vol. 38, No. 4, pp. 393-422. Mars 2002.
- [17] J. HENRY, J. FARGES, and J. TUFFAL. *The prodyn real time traffic algorithm*. In 4th Conference on Control Transportation System, number 472, pages 305-309., 1983.
- [18] J. SPALL and D. CHIN. *Traffic-responsive signal timing for system-wide traffic control*. Transportation Research Part C, Emerging Technologies, 5(3-4) :153-163., 1997.
- [19] K. BEYDOUN. *Conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs*. Université de franche-comte. Décembre 2009.
- [20] K. L. HEAD, P. B. MIRCHANDANI, and D. SHEPPARD. *Hierarchical framework for real-time traffic control*. Transportation Research Record 1360, Transportation Research Board, National Research Council, Washington DC 1992.
- [21] K. YOUSEF, J. AL-KARAKI, and A. SHATNAWI. *Intelligent traffic light flow control system using wireless sensors networks*. Journal of Information Science and Engineering, 26(3) :753-768., 2010.
- [22] L'AIPCR, C.KOREN, R.GHAMAN, C.MAUROIT, and A.BERNARD-GELY. *Congestion urbaine : EXEMPLES de contre-mesures*. La Grande Arche., 2010.
- [23] L. BOUALLOUCHE-MEDJKOUNE. *Modélisation et simulation des Sys-*

-
- tèmes Informatiques et Réseaux de Télécommunications, Cours Ecole Doctorale Informatique ReSyD, Département Informatique, Université de Bejaïa, 2009.
- [24] M. CARDEI, M. T. THAI, Y. LI, AND W. WU. *Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks*. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM), pages 1976-1984, Miami, FL, USA., 2005.
- [25] M. DUCARNE and T. PERINEAU. *Commande adaptative et optimale d'un carrefour à feu*. Technical report., 2007.
- [26] M. LESCIEUX. *Application à la commande floue*. <http://auto.polytech.univtours.fr/automatique/AUA/ressources/Introductionlogiquefloue.ppt>.
- [27] M. SELINGER and L. SCHMIDT. *A review of the cost, maintenance and reliability of popular adaptive traffic control technologies*. Adaptive Traffic Control Systems in the United States. Sep 2009.
- [28] N. HOUNSELL, B. SHRESTHA, F. MCLEOD, S. PALMER, T. BOWEN, and J. HEAD. *Using global positioning system for bus priority in london : traffic signals close to bus stops*. *Intelligent Transport Systems, IET*, 1(2) :131-137. June 2007.
- [29] P. LOPEZ , I. CORREDOR, A. GARCIA and J. MARTINEZ. *Wireless sensor network-based system for measuring and monitoring road traffic*. In 6th Collaborative Electronic Communications and Commerce Technology and Research (COLLECTeR 2008). 2008.
- [30] S. BOUZOUZOU, et N. GUERROUAHANE. *Congestion urbaine : cas du carrefour d'Amriw-ville de Bejaia*. Mémoire de fin de cycle en vue de l'obtention du diplôme de Master en Recherche Opérationnelle., 2011.
- [31] S. FAYE. *Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil*. Thèse P.H.D, LTCl. Décembre 2011.
- [32] S. FDIDA, et G. HEBUTERNE. *Méthodes exactes d'analyse de performance des réseaux*. Edition Lavoisier., 2004.
- [33] S. HEDETNIEMI and A. LIESTMAN. *A survey of gossiping and broadcasting in communication networks*. *Networks (New York, NY)*, Vol. 18, No. 4, pp. 319-349., 1988.
- [34] S. HOCINE, et N. ZAREB. *Détermination du Nombre Optimal de Camions Remorqueurs au Niveau du Terminal à Conteneurs BMT*. Mémoire de fin de cycle pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Recherche Opérationnelle., Juin 2009.

-
- [35] S. KUMAR, T. H. LAI, and A. ARORA. *Barrier coverage with wireless sensors*. In Proceedings of ACM Mobile Computing and networking (Mobicom), pages 284-298, Cologne, Germany., 2005.
- [36] S. TAKAHASHI, H. NAKAMURA, H. KAZAMA, and T. FUJIKURA. *Genetic algorithm approach for adaptive offset optimization for the fluctuation of traffic flow*. In The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, pages 768 - 772., 2002.
- [37] W. WEI and Y. ZHANG. *Fuzzy based traffic signal control*. In IEEE International Conference on Fuzzy Systems, volume 1, pages 296 -300., 2002.
- [38] W.YE and J.HEIDEMANN. *Medium Access Control in Wireless Sensor*. Technical report, USC/Information Sciences Institute, October 2003.
- [39] X.F. CHEN and Z.-K. SHI. *Real-coded genetic algorithm for signal timing optimization of a single intersection*. In 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, volume 3, pages 1245 - 1248., 2002.
- [40] Z. LIAO and L. ZHAO. *Wireless sensor networks help to improve the traffic safety in residential communities*. In 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings, pages 973 -978. June 2006.

Annexe

Généralité sur les lois de probabilité

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 [6].

Définition 4.5.1 *La loi exponentielle de paramètre λ est une variable aléatoire continue T à valeurs positives définie par sa fonction densité de probabilité :*

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

La fonction de répartition de la loi exponentielle est :

$$F_T(t) = \begin{cases} 1 - \exp^{-\lambda t}, & \text{pour } t \geq 0; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

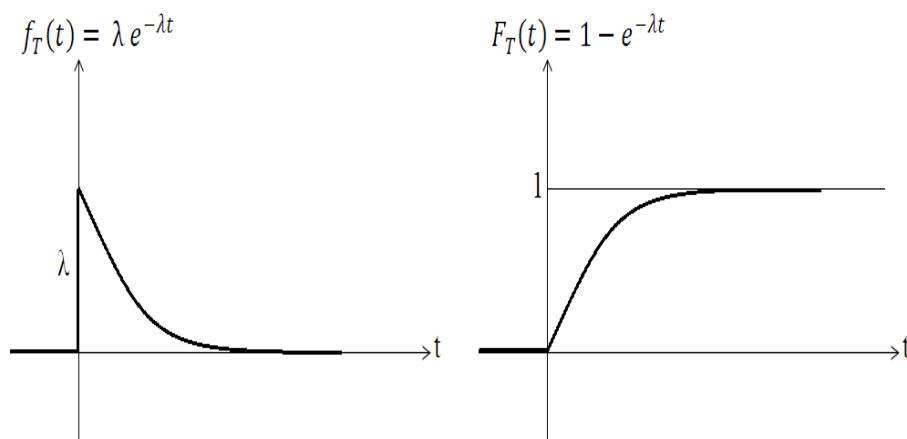


FIGURE 4.2 – Densité de probabilité et fonction de répartition de la loi exponentielle

La moyenne et la variance d'une loi exponentielle sont :
 $E[T] = \frac{1}{\lambda}$ et $var[T] = \frac{E[T^2] - E[T]^2}{E[T]^2} = 1$

Propriété sans mémoire :

$$P[T \leq t + t_0] = P[T \leq t]$$

"La probabilité, sachant que le phénomène que mesure T ne s'est toujours pas produit au temps t_0 , pour qu'il se produise avant t unités de temps supplémentaires, est égale à la probabilité qu'il se soit produit pendant les t premiers instants du phénomène."

La propriété sans mémoire est la propriété essentielle de la loi exponentielle qui fait que cette dernière est très largement utilisée.

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].

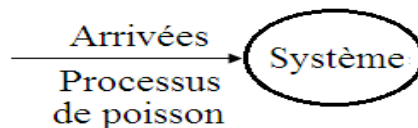


FIGURE 4.3 – Arrivées Poissonniennes

Définition 4.5.2 Une chaîne à temps continu N (processus stochastique à temps continu et à espace d'état discret) est un processus de Poisson de paramètre λ si et seulement si :

- N est un processus de comptage.
- N est un processus stationnaire et à incréments indépendants.
- $P[N(s+t) - N(s) = K] = \frac{(\lambda t)^K}{K!} \exp^{-\lambda t}$, pour $K = 0, 1, 2, \dots$

La propriété suivante se déduit immédiatement de la définition et du fait que le processus de Poisson est un processus de comptage et à [4] :

$$P[N(t) = K / N(t_0) = K_0] = \frac{[\lambda(t - t_0)]^{K - K_0}}{(K - K_0)!} \exp^{-\lambda(t - t_0)}$$

pour $K = K_0, K_0 + 1, \dots$

La propriété suivante s'obtient immédiatement à partir de la précédente en effectuant un développement limité au premier ordre :

$$P[N(t + dt) = K + j / N(t) = K] = \begin{cases} 1 - \lambda dt + o(dt), & \text{si } j = 0 ; \\ \lambda dt + o(dt), & \text{si } j = 1 ; \\ o(dt), & \text{si } j > 1. \end{cases}$$

Interprétation : si les arrivées de clients dans un système suivent un processus de Poisson de paramètre λ , la probabilité qu'il arrive un client entre t et $t + dt$ (dt très petit) est égal à des termes négligeable près à λdt , quel que soit le temps t considéré, et la probabilité qu'il arrive plus d'un client est négligeable.

On peut montrer que la propriété (4.5) est une propriété caractéristique d'un processus de Poisson : tout processus de comptage, stationnaire et à incréments indépendants, vérifiant la propriété (4.5) est un processus de Poisson. Cette propriété très importante est connue sous le nom " propriété caractéristique du processus de Poisson " peut s'interpréter de la façon suivante :

Arrivées Poissonniennes $\Leftrightarrow$ probabilité pour qu'un client arrive pendant $dt \approx \lambda dt$.

On s'intéresse maintenant aux temps d'interarrivées entre deux clients consécutifs.

Définition 4.5.3 Soit A_n la variable aléatoire mesurant l'instant d'arrivée du $n^{\text{ième}}$ client dans le système :

$A_0 = 0$ et $A_n = \inf t / N(t) = n$ (voir figure (4.4)).

Soit T_n la variable aléatoire mesurant le temps séparant l'arrivée du $(n-1)$ ^{ème} client et celle du n ^{ème} client : $T_n = A_n - A_{n-1}$.

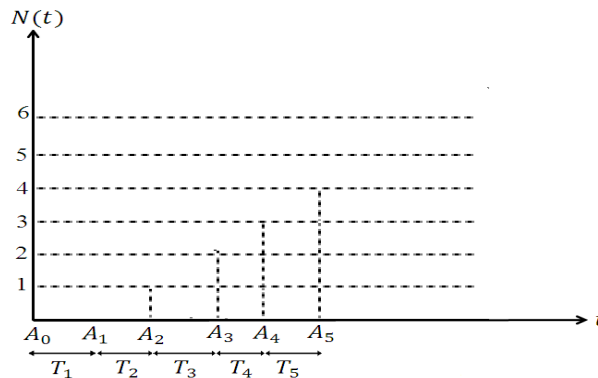


FIGURE 4.4 – Temps d'interarrivées

Les variables aléatoires $\{T_n\}_{n=1,2,\dots}$ sont des variables aléatoires exponentielles indépendantes identiquement distribuées de paramètre λ . La deuxième propriété essentielle du processus d'arrivée (Poissonien) et les variables aléatoires mesurant le temps d'interarrivées (exponentielle).

Arrivées Poissonniennes $\Leftrightarrow$ interarrivées exponentielles.

Les deux propriétés suivantes concernent finalement la décomposition probabiliste d'un processus de Poisson et la superposition de plusieurs processus de Poisson indépendants.

Soit un processus de Poisson de taux λ qui se décompose de façon probabiliste en N processus, chaque nouvelle arrivée participant au processus i avec une probabilité P_i . Chaque processus i , $i = \overline{1, N}$, est un processus de Poisson de taux λP_i .

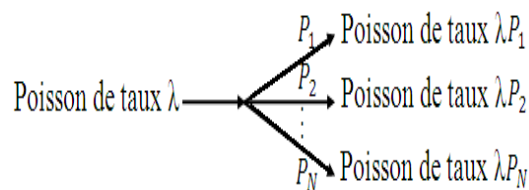


FIGURE 4.5 – Décomposition probabiliste d'un processus de Poisson

Soit un ensemble de N processus de Poisson de taux $\lambda_i, i = \overline{1, N}$, indépendants et qui superposent en un unique processus, chaque nouvelle arrivée de chacun des N processus participant au processus résultant. Ce dernier est un processus de Poisson de taux $\lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i$.

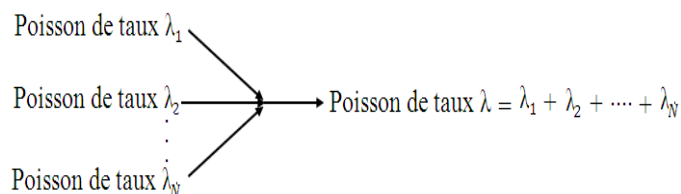


FIGURE 4.6 – Superposition d’un ensemble de processus de Poisson

Loi Gamma

Une variable aléatoire X suit une loi Gamma de paramètres n et θ (strictement positifs), si sa fonction de densité de probabilité peut se mettre sous la forme :

$$f(x, n, \theta) = \begin{cases} \frac{x^{n-1} e^{-x/\theta}}{\Gamma(n) \theta^n}, & x > 0; \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

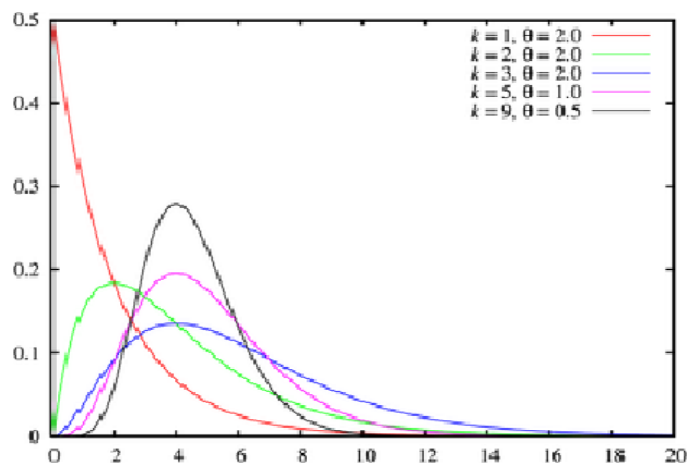


FIGURE 4.7 – Densité de probabilité de la loi Gamma

Caractéristique de la loi Gamma

L'espérance :

$$E(x) = n\theta$$

La variance :

$$n\theta^2$$

La fonction génératrice :

$$(1 - \theta t)^{-n}$$

La famille des distributions Gamma inclut entre autres les lois exponentielles, la distribution de la somme de variables aléatoires indépendantes suivant une même loi exponentielle est une loi gamma, ainsi que la loi du χ^2 .

Résumé

En raison de l'accroissement rapide de la demande de transport au cours des dernières décennies, la congestion est devenue un problème majeur et relativement courant pour la mobilité humaine. Les carrefours jouent le rôle de routage des flux, venant des différentes lignes. Ils constituent un point sensible dans la circulation routière, et ils sont touchés d'une manière directe par la congestion du trafic. L'objectif de ce mémoire est d'appliquer les Systèmes de Transports Intelligents (STI) pour fluidifier les flux du réseau routier. De ce fait, une approche et une modélisation du réseau routier considéré, avec des feux de signalisation basés sur un réseau de capteurs sans fil ont été proposées. Dans ce travail, les carrefours du chemin menant de Tobal vers les Aurès de la ville de Bejaia ont été considérés. Les résultats de simulation ont montré que ces dispositifs peuvent se révéler souples dans le cadre des STI, et participer à faible coût à l'obtention de résultats très intéressants.

Mots clés : Réseau de capteurs sans fil, Système de transport intelligent, Transport urbain, Gestion du trafic routier, Feux de signalisation, File d'attente, Simulation.

Abstract

Road networks have experienced in recent years a large increase in their distribution. Increasing urbanization, and increasing use of cars in commuting causing problems of congestion, particularly in the urban environment. In addition, the crossroads act as routing of flows from different lines. It is a sensitive issue in traffic. It is directly affected by the traffic congestion. The objective of this work is to apply the Intelligent Transportation Systems (ITS) to control and monitor the flow of the road network. Therefore, a modeling approach of three intersections with traffic signals based on a wireless sensor networks have been proposed. In this work, crossroads of the path from Tobal to the Aures in the city of Bejaia were considered. Simulation results have shown that these devices can be flexible and participate in low cost on obtaining interesting results as part of ITS.

Keywords : Roads networks, Urban congestion, Intersection, Extension of the network, Theory queues, Evaluation of performances, Simulation.

