

**République du Burundi  
Ministère de l'Education  
Nationale et de la Recherche  
Scientifique**

**Université du Burundi  
Faculté des Sciences de  
l'Ingénieur**



**Département de TIC**

**Mastère en Génie  
Informatique**

**Année Académique:  
2019-2020**

---

## **GESTION INTELLIGENTE TEMPS REEL DES FEUX DE CIRCULATION**

**« CAS DE CENTRE-VILLE BUJUMBURA »**

---

### **MEMOIRE**

**Présenté Par**

**NIYONKURU Fiston**

**à la**

**Faculté des Sciences de l'Ingénieur (FSI)  
En vue de l'obtention du grade de**

**MASTER**

**en**

**Génie Informatique**

---

**Soutenu, le 09 Septembre 2021, devant le jury composé de :**

<b>Pr</b>	<b>NDIKUMAGENGE Jérémie</b>	<b>Président</b>
<b>Dr</b>	<b>SAHINGUVU William</b>	<b>Vice-Président</b>
<b>Dr</b>	<b>NKUNZIMANA Hilaire</b>	<b>Secrétaire</b>
<b>Dr</b>	<b>MUKESHIMANA Michèle</b>	<b>Membre</b>
<b>Dr</b>	<b>KIBEYA Hassan</b>	<b>Directeur</b>

**IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY**

Pr. NDIKUMAGENGE Jérémie	Président
Dr. SAHINGUVU William	Vice-président
Dr. NKUNZIMANA Hilaire	Secrétaire
Dr. MUKESHIMANA Michèle	Membre
Dr. KIBEYA Hassan	Directeur

## **DEDICACES**

Je dédie ce modeste travail:

A celle qui a attendue avec impatience les fruits de sa bonne éducation : ma mère ;

A mon proche oncle et sa famille;

A mes grandes sœurs;

A mon petit frère;

A tous mes cousins et cousines;

A tous mes oncles et tantes;

A mes amis d'enfance;

A celle que j'ai partagée les plus difficiles moments de préparation du présent mémoire;

A toute ma promotion de Master ;

A tous mes amis et tous ceux que j'ai connus.

## REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie DIEU qui m'a aidé et donné la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire particulièrement à mon épouse Mme AKIMANA Online.

Ces remerciements vont aussi au corps professoral et administratif de la Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Technologie d'Information et de la Communication (FSI/TIC) de l'Université du Burundi, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée. J'adresse un grand remerciement à notre encadreur de Mémoire Dr. Ir **Hassan Kibeya**, pour m'avoir proposé ce projet de fin d'étude, pour ses conseils et ses directives du début à la fin de ce travail. Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre projet en acceptant d'examiner ce travail. Je ne remerciais pas assez mes chers parents pour leur amour, leur soutien et leur patience. Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

## Résumé

La gestion du trafic routier dans le centre-ville de Bujumbura est un problème qui nous préoccupe quotidiennement lors de la congestion routière dans les heures des pointes, cet aspect critique intervenant au quotidien est défavorable à de nombreux domaines, tels que l'économie ou encore l'écologie.

Dans notre mémoire de fin d'étude nous avons utilisé la Nouvelle Technologie d'Information et de la Communication (NTIC) pour faire face à ces problèmes. Ces technologies peuvent servir dans les rues en zone urbaine que sur les principales intersections entrant au centre - ville. L'utilisation de la technologie et l'analyse en temps réel peuvent conduire à une gestion plus fluide du trafic.

La congestion du trafic est souvent due à une mauvaise hiérarchisation du trafic, alors que le nombre de véhicules et de la population augmentent à un rythme accéléré, l'infrastructure des villes n'est pas en mesure de faire face à cette croissance. Pour que notre système de gestion intelligente en temps réel feux de circulation dans le centre – ville soit mis en œuvre, il faut avoir des données de qualité actualisées sur la circulation actuelle de la ville.

**MOTS CLÉS :** Gestion de feux de circulation, réseau de capteurs sans fil, raspberry pi, Algorithmes de contrôle des feux de circulation, système de transport Intelligente, algorithme TAPIOCA.

**Abstract**

The management of road traffic in downtown Bujumbura is a problem that worries us daily during road congestion in times of the points, this critical aspect occurring on a daily basis is unfavorable in many areas, such as the economy or even transport. 'ecology.

For these reasons, intelligent transport systems (ITS) have appeared since the end of the 1990. In our final thesis, we used New Information and Communication Technology (NICT) to deal with these problems. Problems. These technologies can be used on urban streets as well as on major intersections entering downtown. The use of technology and real-time analysis can lead to smoother traffic management. Traffic congestion is often due to poor prioritization of traffic, as the number of vehicles and population increase at an accelerated rate, the infrastructure of cities is not able to cope with this growth. In order for our intelligent real-time traffic light management system in the city center to be implemented, there must be up-to-date quality data on the current city traffic, raspberry pi cards, traffic network. Wireless sensors and controllers.

**KEYWORDS:** Traffic light management, wireless sensor network, raspberry pi, Traffic light control algorithms, intelligent transport system, TAPIOCA algorithm.

## LISTE DES ABREVIATIONS

API	: Application Programming Interface
ARM	: Advanced Risc Machine
CAN	: Conversion Analogique Numérique
Carte SD	: Secure Digital
CERT	: Centre d'Etude et de Recherche de Toulouse
CERT	: Centre d'Etude de Régulation du Trafic
Co2	: Oxyde de carbone
CPU	: Central Procession Unit
DBm	: Décibel /Mètre
DN	: Destination de Nœud
E(t)	: Energie Stockée
FA	: File d'Attente
FIFO	: First In First Out
GPU	: Graphical Processing unit
HC	: Energy Harvester
HDMI	: High Definition Multimedia Interface
HTTP	: Hypertext Transfer Protocol
HTTPS	: Hypertext Transfer Protocol Secure
IEEE	: Institute of Electrical and Electronic Engineers
LED	: Light Electroluminescent Diode
LEO	: Leo Earth Orbit
LTS	: Long Term Support
MAC	: Media Access Control
MANET	: Mobile Ad Hoc Network
Netconvet	: Network Conversion
Netgen	: Network Generator
Nox	: Oxyde d'Azote
NTIC	: Nouvelle Technologie d'Information et de la Communication
OpenGL	: Open Graphics Library
OPL	: Onu Public

OSM	: OpenStreetMap
PC	: Point de Control (n'est pas confondit personal Computer)
PRODYN	: PROgrammation DYNamique
QoS	: Quality of Service
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
RAM	: Random Access Memory
RC	: Rayon de Communication
RCSF	: Réseau Capteur Sans Fil
RF	: Radio Fréquence
RJ45	: Registered Jack number 45
RN1	: Route National numéro 1
RN4	: Route National numéro 4
RN5	: Route National numéro 5
RN9	: Route National numéro 9
RPi	: Raspberry pi
RS	: Rayon de Sensation
SCOTT	: Split Cycle Optimisation Technique
SE	: Système d'exploitation
SenSys	: Sensor System
SN	: Source de Noeud
SNP	: SenSys Network Nano Power
STI	: Système de Transport Intelligent
SUMO	: Simulation Urban Mobility
SURF	: Système urbaine de réseau filaire
TAPIOCA	: Distributed and Adaptive Intersection Control Algorithm
TDMA	: Time Division Multiple Access
TIC	: Technologie d'Information et de la Communication
TMN	: Task Manager Node
TRANSY	: Split Cycle and Offset Optimization Technique
TRL	: Traffic Research Laboratory
USB	: Universal Serial Bus

UTCS	: Urban Traffic Control Software
VGA	: Video Graphique Array
W3C	: World Wide Web Consortium
WSN	: Wireless Sensor Network
XML	: Extensible Mark Up Language

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1 -Réseau des transporteurs privés (bus) existant à Bujumbura.....	4
Figure I.2- Image de l'intersection de la Gale du Nord RN1 récupérer via OSM .....	5
Figure I.3-Feu de circulation.....	7
Figure I.4-Algorithmme de cycle de feu de circulation.....	8
Figure II.1-Capteur .....	14
Figure II.2-Composant de boucle inductive.....	16
Figure II.3-Capteur électromagnétique sans fil 5003E .....	19
Figure II.4-camera de détection reliée par feu de circulation.....	20
Figure II.5-Composantes d'un nœud du capteur .....	21
Figure II.6- Architecture de Communication dans un RCSF.....	22
Figure II.7-Structure de communication RCSF .....	25
Figure III.1-Image de l'embouteillage sur intersection RN1 .....	29
Figure III.2-Graphique de comparaison entre routes A et B, C sur l'intersection RN1 dans l'avant midi.....	31
Figure III.3-Graphique de comparaison entre routes D et E sur l'intersection RN1 dans l'après-midi après le travail.....	31
Figure III.4-Graphique de comparaison entre routes A et B sur l'intersection de Nations unis RN 9 dans l'avant-midi .....	32
Figure III.5-Exemple d'une Intersection isolée avec feu de circulation .....	34
Figure III.6-Exemple Boucles magnétiques en amont et en avant de l'intersection.....	36
Figure III.7 -Architecture de Chaîne d'information d'un STI .....	40
Figure III.8-Représentation de la structure de base d'une FA .....	42
Figure III.9-Schéma file d'attente.....	45
Figure III.10-Réseau de files d'attente ouvert à deux files.....	47
Figure III.11-Réseau de files d'attente fermé à deux files.....	48

Figure III. 12- Architecture de TAPIOCA .....	50
Figure III.13-Diagramme d'activités en collaboration avec TAPIOCA .....	54
Figure III.14-Algorithmme simplifié de contrôle de feu.....	55
Figure III.15-Algorithmme TAPIOCA détaillé.....	56
Figure IV.1-Architecture de Génération d'un réseau routier .....	60
Figure IV.2- Diagramme d'activité de Cycle de simulation .....	61
Figure IV.3-Raspberry Pi 3 model B+ .....	64
Figure IV.4-Diagramme d'activités de suivi des véhicules .....	70
Figure IV.5- Algorithmme d'allumer le feu de circulation sur une seule voie en temps réel	72
Figure IV.6- Algorithmme d'allumer le feu de circulation sur 3 voies en temps réel.....	73
Figure IV.7-Resultat des véhicules détectés en temps réel.....	74
Figure IV.8-Resultat d'estimation de vitesse des véhicules en temps réel .....	75
Figure IV.9-Resultat final de Simulation avec SUMO .....	81
Figure IV.10- Architecture général de mon travail.....	85

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1-Tableau montrant l'augmentation de la population dans la ville de Bujumbura par an.....	6
Tableau IV.1-Tableau de données de routes A et B .....	82
Tableau IV.2-Tableau de données de routes D et E .....	82
Tableau IV.3- Résultat de simulation montrant le temps moyen de la file A et B de l'avant midi.....	83
Tableau IV.4- Résultat de simulation montrant le temps moyen de la file A et B dans l'après midi .....	83

## TABLE DES MATIERES

<b>IDENTIFICATION DES MEMBRES DU JURY</b> .....	i
<b>DEDICACES</b> .....	ii
<b>REMERCIEMENT</b> .....	iii
<b>Résumé</b> .....	iv
<b>Abstract</b> .....	v
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	vi
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	ix
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	xi
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	xii
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	xvii
<b>CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
I.1. Choix du thème .....	3
I.2. Historique du centre-ville de Bujumbura.....	3
I.3. Feux de signalisation.....	6
I.4. Gestion des feux de signalisation.....	7
I.5. Système de Transport Intelligent .....	8
I.6. Contribution .....	9
<b>CHAPITRE II : RESEAUX CAPTEURS SANS FIL DANS LE TRAFIC ROUTIER</b> .....	11
II.1. Introduction.....	11
II.2. Définition du RCSF .....	12
II.3. Caractéristiques des RCSFs.....	12
II.3.1. Classification des RCSFs.....	13

II.3.2. Type des capteurs sans fil.....	14
II.3.3. Capteur a bouclé inductif.....	16
II.4. Capteur intelligent .....	16
II.4.1. Capteur magnétomètre sans fil .....	17
II.4.2. Caméra de détection d'un Véhicule .....	19
II.5. Architecture du réseau de capteur .....	20
II.5.1. Architecture d'un nœud .....	20
II.5.2. Architecture de communication d'un réseau de capteurs.....	21
II.5.3. Caractéristiques principales d'un RCSF .....	22
II.6. Structure de communication d'un réseau capteur sans fil.....	24
II.7. Conclusion .....	26
<b>CHAPITRE III : GESTION DE TRAFIC ROUTIERE .....</b>	<b>27</b>
III.1. Introduction .....	27
III.2. Congestion urbaine.....	27
III.2.1. Définition de congestion routière.....	28
III.2.2. Nature de la congestion routière dans la ville .....	29
III.2.3. Causes de l'émergence du problème de la congestion.....	30
III.2.4. Conséquence de la congestion routière dans la ville.....	32
III.2.5. Avantages du contrôle du trafic .....	32
III.3. Systèmes de gestion classiques des feux de circulation.....	33
III.3.1. Gestion des feux de circulation .....	33
III.3.2. Contrôleur de feux.....	33
III.3.3. Phase de feux de circulation.....	33
III.3.4. Cycle de feu.....	34

III.3.5. Détecteur des véhicules .....	34
III.3.6. Plan de signalisation.....	34
III.3.7. Types de contrôle des feux de signalisation.....	35
III.4. Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs .....	35
III.4.1. Trafic Network Study Tool .....	35
III.4.2. Split Cycle And Offset Optimisation Technique .....	36
III.4.3. Programmation Dynamique .....	37
III.4.4. Split Cycle Offset Optimisation Technique .....	37
III.5. Système de Transport Intelligent dans la ville .....	37
III. 5.1. Introduction .....	37
III.5.2. Contexte et applications au milieu urbain .....	38
III.5.3. Domaines d'application de STI.....	38
III.6. Fonctions et Application des STI à l'exploitation des réseaux.....	39
III.6.1. Application des STI à l'exploitation des réseaux routières.....	39
III. 6.2. Fonctions des composantes de STI .....	39
III.7. Modélisation du trafic routière.....	40
III.7.1. Contrôle dynamique par l'infrastructure .....	40
III.7.2. Outils Théoriques .....	41
III.7.3. Théorie de file d'attente et Application .....	42
III.7.4. Système M/M/1 .....	44
III.7.5. Temps d'attente total de tous les véhicules.....	45
III.8. Réseaux de file d'attente .....	46
III.8.1. Réseaux ouverts.....	47
III.8.2 Réseaux fermés.....	47

III.8.3. Réseaux multi-classes .....	48
III.8.4. Réseaux mixtes.....	48
III.9. Algorithmes de contrôle des feux de circulation .....	48
III.9.1. Algorithme Distribué et Adapté au Contrôle d' Intersection.....	49
III.9.2. Architecture .....	50
III. 9. 3. Distance entre les nœuds Source et Destination .....	51
III.10. Conclusion.....	57
<b>CHAPITRE IV : SIMULATION DU TRAFIC.....</b>	<b>58</b>
IV.1. Introduction de la simulation .....	58
IV.2. Généralité sur la simulation .....	58
IV.2.1. Pourquoi Simulateur SUMO.....	59
IV.2.2. Génération du réseau routier .....	59
IV.2.3. Cycle de simulation.....	60
IV.3. Types de simulation .....	62
IV.3.1. Systèmes de simulation discrets.....	62
IV.3.2. Systèmes de simulation continue .....	62
IV.3.3. Simulation par événement discrets .....	62
IV.4. Outil de simulation.....	62
IV. 4.1. Raspberry pi .....	63
IV.4.2. Cameras pi.....	66
IV.4.3. OpenCV.....	66
IV.4.4. Algorithme de détection de véhicule .....	71
IV.4.5. Langage de programmation Python.....	76
IV.4.6. OpenStreetMap .....	78

IV.5. Fichier XML.....	78
IV.5.1. Simulation avec SUMO 0.32.0 .....	80
IV.5.2. Variables de simulation.....	81
IV.5.3. Résultats de simulation .....	83
IV.5.4. Interprétation des résultats de simulation .....	84
IV.5.5. Variable obtenus par l'architecture de notre système.....	85
IV.6. Conclusion.....	86
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION.....</b>	<b>87</b>
Conclusion Générale .....	87
Recommandation.....	89
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>90</b>

## **AVANT-PROPOS**

Dans notre travail de fin des études de master en génie informatique intitulé « Gestion Intelligente temps réel des feux de circulation cas du centre-ville de Bujumbura. » Ce travail a été effectué sur trois intersections l'un de la gale du nord RN1, l'autre sur l'intersection de Nation Unis RN9, et le dernier sur l'intersection de Brarudi RN 5, en se référant aux données recueillies sur terrain.

A cet effet nous avons organisé ce travail en quatre chapitres. Le premier chapitre concerne l'introduction générale sur les différents points de notre travail, il présente l'histoire du centre-ville de Bujumbura, Feux de signalisation, Système de Transport Intelligent (STI), et nous proposons notre Contribution à ce problème. Le second chapitre est consacré à l'introduction des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), le fonctionnement des différents types de capteurs sans fil, et nous présentons entre autres leur architecture, leurs caractéristiques, acquisition de données des véhicules grâce à un camera en temps réel. L'accent est mis sur la description des types de capteurs ainsi que leurs domaines d'application. Concernant le troisième chapitre basé sur la gestion de trafic routier dont nous avons utilisé des Outils de Système de Transport intelligent (STI), les Algorithmes de contrôle des feux de circulation, la Théorie de file d'attente comme le modèle mathématique, nous présentons encore les différentes approches qui ont pour véhicule de régulariser le trafic routier et de diminuer la congestion grâce à l'optimisation des feux de circulation. Le dernier chapitre reflète sur les résultats de la simulation par événements discrets du réseau de files d'attente correspondant au chemin (Gale du nord RN1, Nation Unis RN3 et celle de la Brarudi RN5). Enfin nous avons utilisé le simulateur SUMO comme simulateur de trafic routier qui va nous aider à accomplir notre tâche de simulation.

## CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Les transports terrestres occupent une place majeure dans notre société, notamment dans les grandes villes où les ralentissements aux heures de pointe de 6h30 minutes à 9h30 minutes, de 17h45 minutes à 18h30 minutes, peuvent avoir un impact notable pour se déplacer et sur l'organisation des activités, l'économie ou encore l'écologie. Les nouvelles technologies de l'information et de la communication ont permis, en l'espace de quelques années, de mettre en œuvre des systèmes de gestion intelligente.

À l'aide de multiples points de mesures répartis sur le territoire, un opérateur peut dénombrer les usagers et en déduire la charge du réseau. Il peut, par ailleurs, réagir aux variations du trafic en régulant dynamiquement les flux de véhicules. Les équipements tels que les feux de circulation deviennent alors des éléments actifs dans la réduction intelligente des embouteillages et dans la gestion de la sécurité, améliorant globalement l'expérience des usagers.

Les infrastructures routières sont généralement coordonnées par un point de contrôle, responsable du maintien des équipements, de leurs réglages initiaux et de la gestion des incidents (matériels ou humains).

Cette mémoire de fin d'étude de mastère vise à étudier l'emploi des systèmes distribués afin de mettre en œuvre des systèmes de gestion intelligente temps réel de trafic routier dans le centre-ville de Bujumbura grâce à un réseau de capteurs sans fil couplés à une unité de détection (capteurs magnétomètre sans fil et cameras), les capteurs seront en communication directe par réseaux sans fil et le point de contrôle ordonnera le feu de circulation du trafic routier à réagir en temps réel. L'utilisation de Nouvelle Technologie d'Information et de Communication (NTIC) conduit à une gestion plus fluide du trafic routier temps réel. La congestion du trafic est souvent due à une mauvaise hiérarchisation du trafic :

- le nombre des véhicules augmente à un rythme accéléré ;
- la population Burundaise quitte l'intérieur du pays pour y arriver au centre-ville ;
- élargissement de la ville du jour au jour ;

- augmentation de transport à deux roues motorisés et non motorisés ;
- et augmentation de la population en général.

Les infrastructures routières restant inchangé, ce qui sont les causes principales de l'embouteillage, l'infrastructure des villes n'est pas en mesure de faire face à cette croissance de la ville [3,29].

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

Le premier chapitre concerne l'introduction générale sur les différents points de notre mémoire, il présente l'historique du centre-ville de Bujumbura, Feux de signalisation, Système de Transport Intelligent (STI), et nous proposons notre Contribution à ce problème.

Le deuxième chapitre est consacré à l'introduction des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil (RCSF), le fonctionnement des différents types des capteurs sans fil, nous présentons entre autres leur architecture, leurs caractéristiques, acquisition de données des véhicules grâce d'un camera en temps réel, les facteurs influençant leur conception. L'accent est mis sur la description des types de capteurs ainsi que leurs domaines d'application

Concernant le troisième chapitre basé sur la gestion de trafic routier dont nous avons utilisé des Outils de Système de Transport intelligent (STI), les Algorithmes de contrôle des feux de circulation, la Théorie de file d'attente comme le modèle mathématique, nous présentons encore les différentes approches qui ont pour véhicule de régulariser le trafic routier et de diminuer la congestion grâce à l'optimisation des feux de circulation.

Le dernier chapitre reflète sur les résultats de la simulation par événements discrets du réseau de files d'attente correspondant au chemin (Gale du nord RN1, Nation Unis RN3 et celle de la Brarudi RN5). Enfin nous avons utilisé le simulateur SUMO comme simulateur de trafic routier qui va nous aider à accomplir notre tâche de simulation.

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

## **I.1. Choix du thème**

Après avoir fait la descente sur terrain et analysé tous les problèmes causés par l'embouteillage au centre-ville de Bujumbura surtout sur les intersections principales dans les heures de pointes où la congestion est l'un des problèmes majeur à l'économie du pays, dans ce cas nous avons pensé à la solution qui permet de résoudre ces problèmes de la congestion. La seule technique qui permet de gérer la congestion est de mettre en place un système intelligent dans les principales intersections entrant au centre-ville, élargir les voies (auto routes) ou routes superposer.

## **I.2. Historique du centre-ville de Bujumbura**

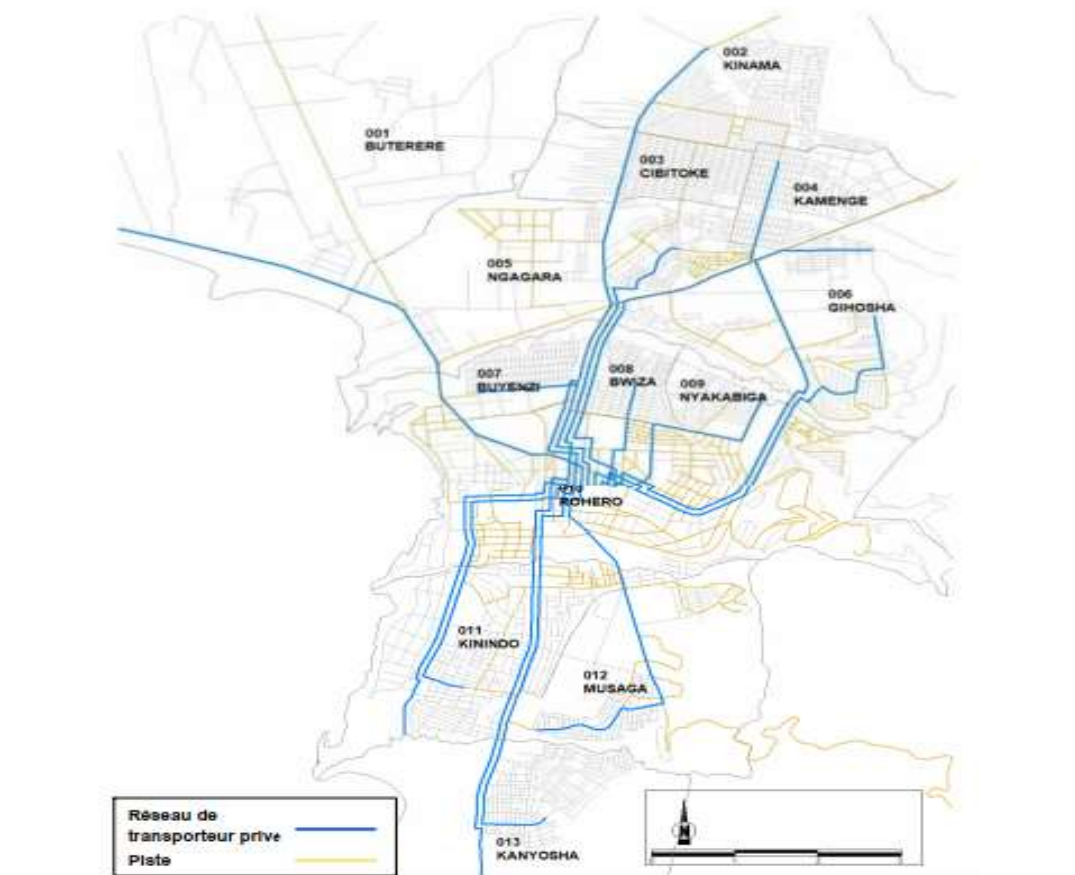
Bujumbura, la capitale du Burundi, se situe au nord-est du Lac Tanganyika. Étant la plus grande ville du Burundi depuis 1980 après l'indépendance du pays du 1 juillet 1962.

La population de Bujumbura est estimée à 743.514 en 2019 avec une projection d'augmentation de 839.854 en 2025 [3]. La ville de Bujumbura est située entre des montagnes à l'Est et le lac Tanganyika à l'Ouest, et s'étend sur une largeur d'environ 4 km en direction Nord-Sud. La commune de ROHERO est le centre administratif, commercial et d'affaires de la ville. Une zone industrielle est située autour du port dans le nord et la plupart des usines de grande taille du Burundi y sont localisées. Les zones résidentielles entourent encore ces deux zones, ce qui forme la ville de Bujumbura. La structure fondamentale du réseau de routes de Bujumbura est formée de 5 routes nationales, route dédié Lieutenant Général Adolphe NSHIMIRIMANA RN 9, connecté avec le boulevard du peuples MURUNDI, Boulevard dédié Héros de la Démocraties du Burundi Président Melchior NDADAYE RN5, avenues du large, routes JENDA RN7, routes RUMONGE RN3 et routes du Gale du Nord RN1 dédié Boulevard de MWAMBUTSA.

Le système de transport urbain de la ville de Bujumbura est dominé par le transport en commun, le Transport à deux roues motorisés et non motorisés. Le Transport non motorisé représente la part essentielle des déplacements réalisés chaque jour dans la ville de BUJUMBURA également la marche à pied occupe une place non négligeable dans le déplacement des habitants de la ville. En revanche, l'usage de la voiture particulière est encore faible en un pourcentage de 38,5% au centre-ville. Dans la ville de BUJUMBURA,

il y a lieu de relever les catégories de transport suivantes qui doivent être en harmonie selon les infrastructures routières existantes :

- Le transport en commun des personnes;
- Le transport individuel de personnes;
- Le transport par véhicule individuel (privé);
- Le transport par moto;
- Le transport par vélo;
- La marche à pied ;
- Le transport de marchandises ;
- transport informel de personnes et des biens.



**Figure I.1 -Réseau des transporteurs privés (bus) existant à Bujumbura**

En 2017, l'invention des feux de signalisation comme système de gestion de trafic routier au centre-ville de Bujumbura capitale économique du Burundi. Ces feux de signalisation routière ou feux tricolores ne sont pas installés dans tout le pays.

Même dans le seul centre-ville où ils sont installés, ils peinent à fonctionner et sont quelquefois éteints. Les usagers de la route estiment qu'il faut les installer au moins dans les grands centres urbains comme Gitega, Ngozi pour éviter les accidents et gérer de la circulation routière.

Les feux de circulation routière se trouvent dans une seule ville, à savoir la capitale économique Bujumbura. Installés sur 18 carrefours par une entreprise chinoise *Sinohydro Tianjin*, ces feux sont parfois dysfonctionnels. Pourtant, ils sont d'une importance capitale dans la circulation routière. Dans notre travail, nous nous sommes basés sur la gestion intelligente de trafic sur trois (3) intersections à savoir: intersection de la Gale du nord Boulevard de MWAMBUTSA (RN 1), intersection de Nation Unis routes (RN9) et celle de Boulevard dédié Héros de la Démocraties du Burundi Président Melchior NDADAYE (RN5). Notons que l'intersection de la gale du nord (RN1) sera considérée comme intersection principale qui sera en communication via RCSF avec d'autres intersections citées ci-haut.



**Figure I.2- Image de l'intersection de la Gale du Nord RN1 récupéré via OSM [13]**

**Tableau I.1-Tableau montrant l'augmentation de la population dans la ville de Bujumbura par an**

<b>Année</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>
<b>Bujumbura</b>	584.0	603.1	621.8	639.9	657.7	674.9	692.3	709.6	726.7	743.5	759.90	839.854
<b>a mairie</b>	57	85	04	89	04	41	30	40	33	14	0	

Le tableau ci-haut nous montre l'augmentation de la population dans la mairie de Bujumbura d'où l'annuaire d'augmentation de la population pour chaque province du pays rédigé par Institut de Statistique et d'Etudes Economiques du Burundi (ISTEEBU) ou l'augmentation de la population est estimé à 743.514 en 2019 avec une projection d'augmentation de 839.854 en 2025.

### **I.3. Feux de signalisation**

Un feu de circulation routière, aussi appelé feu tricolore est un dispositif permettant la régulation du trafic routier entre les usagers de la route, les véhicules et les piétons.

Les feux destinés aux véhicules à moteurs sont généralement de type tricolore. Ceux destinés aux piétons sont bicolores et se distinguent souvent par la reproduction d'une silhouette de piéton. Les feux tricolores pour cyclistes se distinguent par la reproduction d'une bicyclette. Un carrefour ou intersection à feux tricolores est commandé par un contrôleur de feux, appareil électronique de contrôle/commande.

Les feux sont généralement déclinés à partir de deux couleurs de base : le rouge pour fermer, le vert (ou encore le bleu plus rarement) pour ouvrir. Le jaune-orangé est également utilisé et sert à signaler le passage du feu vert au feu rouge (et aussi, dans certains pays, du feu rouge au feu vert).

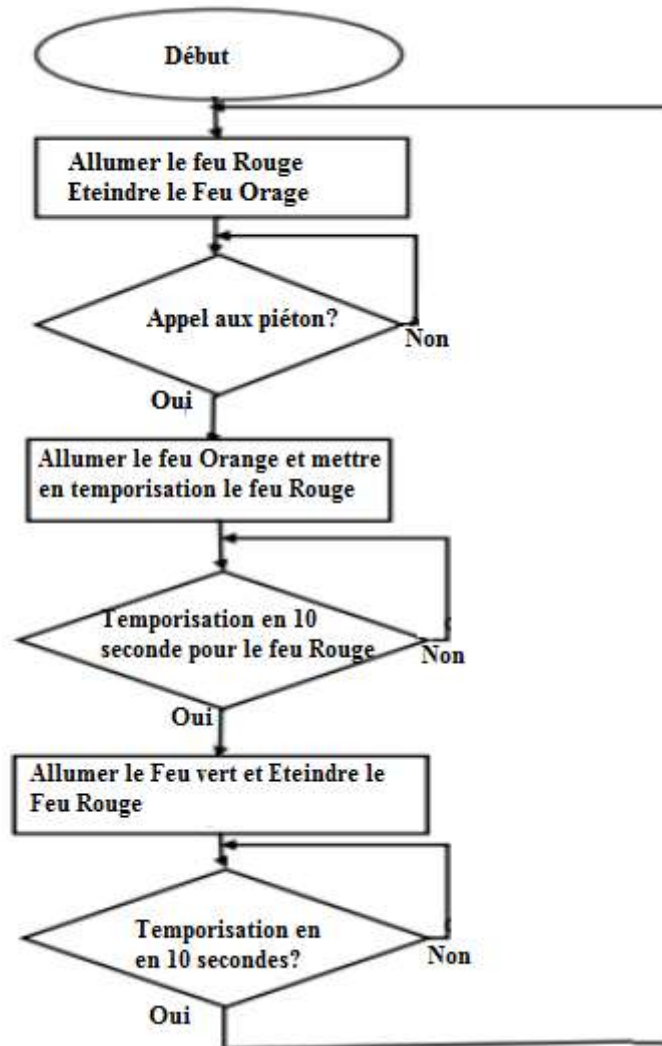
Ces couleurs ont l'avantage d'être très différentes, sauf pour la plupart des daltoniens ; mais, pour eux, la position du feu (en haut, au milieu, en bas, ou parfois à gauche, au milieu, à droite).



**Figure I.3-Feu de circulation**

#### **I.4. Gestion des feux de signalisation**

La gestion de la circulation routière s'exerce à l'aide de divers instruments et méthodes, allant de la signalisation à la législation, en passant par l'information des usagers, aménagement par information, l'équipement des véhicules, les théories de trafic, point de contrôle, etc. La gestion des feux de signalisation est un moyen efficace qui permet de gérer tout le mouvement de trafic routier grâce à des outils appropriés dans le domaine transport.



**Figure I.4-Algorithmme de cycle de feu de circulation**

Le Figure I.1 nous aide à montrer les interactions qui existent au moment d’allumer le feu vert, rouge et orange. S’il allume feu vert il y a la temporisation de quelque seconde avant d’afficher le feu rouge même le feu orange qui est destiné à l’accès aux piétons. Rappelons que les feux vert et rouge ne s’affichent en même temps, et le cycle de temps n’est pas égal.

### **I.5. Système de Transport Intelligent**

Les systèmes de transport intelligents (STI) sont apparus depuis la fin des années 1990, ce système désigne une ville utilisant nouvelle technologie de l’information et de la communication (TIC) pour améliorer la qualité des services urbains ou encore réduire ses coûts.

Dans ces villes intelligentes on trouve les « systèmes de transport intelligents » (STI) qui sont des applications ou services avancés associant l'ingénierie des transports, les technologies de la communication, de l'information et du positionnement géographique. Il existe plusieurs types de réseaux informatiques assurant la communication entre les différents composants d'un STI, tel que la technologie de l'information et de communication à l'intérieur des véhicules et l'infrastructure des transports va révolutionner la manière de voyager aujourd'hui. Ces applications nous permettent la diffusion et la collecte d'informations utiles entre les véhicules et entre infrastructures et les véhicules de transport dans le cadre d'aider les conducteurs à voyager en toute sécurité et confortablement. Les systèmes de transport évoluent vers les systèmes de transport intelligents (STI) et la dépendance des transports routiers dans nos vies quotidiennes a augmenté massivement au cours des dernières années, en ligne avec les problèmes découlant de son utilisation : la congestion sur les routes et les centres urbains, les pertes d'énergie.

## **I.6. Contribution**

Notre contribution à ce problème doit être généralisée afin d'être utilisée dans de nombreuses villes urbaines du pays comme GITEGA et NGOZI où les embouteillages aux heures de pointe deviennent une affaire de routine. Dans ce projet, nous allons essayer de résoudre le problème précédent et fluidifier de façon optimale la circulation des véhicules. Nous allons devoir déployer des techniques de détection des véhicules. Les images peuvent être détectées à partir des caméras reliées sur poteau en face de feu de signalisation et seront traitées par OpenCv. Éventuellement, nous mettrons également en place un système intelligent temps réel pour faciliter le fonctionnement des feux de signalisation, où la densité du trafic serait également prise en compte dans le processus de prise de décision. Nous prenons par exemple, trois intersections des quatre routes pour chacun et l'autre de trois routes, notre système prendra des photos des véhicules de chacune des quatre routes et extraira la densité de trafic sur l'ensemble de ces routes par détection de contour. La décision sera prise par un algorithme de contrôle de feu de signalisation afin de communiquer avec d'autres nœuds via le RCSFs, nous faisons correspondre les images traitées à l'image grâce du logiciel OpenCV.

Le système utilisera la carte Raspberry pi, cameras, capteur magnétomètre sans fil inséré dans la chaussée pour détecter la présence et le passage des véhicules a fin de transfert les données en temps réel vers au point de contrôle. Ces capteurs sans fil transmettent leurs données détectées en temps réel par onde radio à un concentrateur raccordé à un point de contrôle (PC) trafic et/ou un contrôleur de feux ou elle peut être fixée localement sur le feu. En faisant cela, nous espérons que le trafic routier sera régulé d'une une façon intelligente et les embouteillages, les accidents diminueraient à un pourcentage efficace et considérablement à ce dernier.

## **CHAPITRE II : RESEAUX CAPTEURS SANS FIL DANS LE TRAFIC ROUTIER**

### **II.1. Introduction**

Depuis quelques années, le marché des réseaux et des applications sans fil s'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 (RCSF), en anglais Wireless Sensor Networks (WSNs).

De nos jours, grâce à la technologie avancée et plus particulièrement à l'évolution de la microélectronique et de la communication sans fil, les réseaux de capteurs ont connu un essor considérable. Généralement, ces réseaux se composent d'un grand nombre de nœuds (capteurs) capables de mesurer des phénomènes, d'effectuer des calculs et de communiquer les uns aux autres à travers une transmission multi-sauts sans fil. Ces nœuds remplissent deux rôles essentiels : le recensement et la transmission de l'information au reste du réseau. Les composantes principales d'un nœud de capteur typique incluent une antenne et une radiofréquence (RF), un émetteur-récepteur pour permettre la communication avec d'autres nœuds, une unité de mémoire, un CPU, un ou des capteurs (de lumière, de température, de pression barométrique, d'accélération sismique, d'acoustique) et un interrupteur contrôlant l'alimentation assurée par des batteries [24].

Les réseaux de capteurs sans fil (RCSFS) sont utilisés dans plusieurs domaines d'application à savoir : le domaine militaire, environnemental, médical mais aussi dans le domaine de surveillance, de traçabilité et de localisation notamment lorsqu'il s'agit du contrôle du trafic routier.

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur les réseaux de capteurs sans fil, leurs architectures, leurs caractéristiques, leurs classifications, leurs types dans le trafic Routier ainsi que leurs domaines d'applications [21].

## II.2. Définition du RCSF

Les réseaux de capteurs sans-fil sont composés de dispositifs électroniques conçus pour mesurer une grandeur physique de l'environnement dans lequel ils sont déployés et pour acheminer ces mesures à un système d'information.

Les réseaux de capteurs sans fil appartiennent à la famille des réseaux mobiles ad hoc (MANET) et se composent d'un large ensemble de capteurs à capacité et énergie généralement limitées.

Les capteurs sont constitués des unités suivantes :

- Unité d'acquisition : permet le recueil de données environnementales et la conversion analogique vers numérique (CAN);
- Unité de calcul : permettant le lancement de procédures, protocoles et autres ;
- Unité de communication : permettant la connexion au réseau (émission et réception). Ceci, en sans-fil (ex : onde radio), souvent en multi-sauts et permettant de s'affranchir des inconvénients filaires (temps d'installation et facilité d'accès);
- Unité d'énergie : qui permet la répartition de l'alimentation entre les différents constituants du capteur.

Dans de nombreux cas, les capteurs sont dispersés dans des zones pauvres en énergie, et sont dotés d'une batterie non-rechargeable et non-renouvelable [14]. Dans le cas du trafic routier, il est néanmoins possible voire nécessaire de s'abstenir de contrainte énergétique. Le rôle de chaque capteur est de récolter un ensemble de données dans son environnement, et le transmettre en temps réel de proche en proche jusqu'à atteindre généralement au point de contrôle, qui peut jouer le rôle de coordinatrice du réseau et communiquer vers l'extérieur les données importantes recueillies [41,30].

## II.3. Caractéristiques des RCSFs

Nonobstant le grand nombre de capteurs déployés lors de l'installation d'un RCSF, de fortes contraintes en termes d'énergie, de capacité mémoire, de traitement et de durée de vie subsistent encore [34]. Parmi les caractéristiques les plus importantes pour l'accomplissement des tâches assignées aux applications, nous pouvons citer:

- **Le Type de service** : on s'attend à ce que le RCSF offre à l'utilisateur des informations significatives ;
- **La Qualité de service (QoS)** : c'est une métrique qui va être offerte par un RCSF à ses utilisateurs ou applications. Le niveau de QoS est défini par un ensemble d'attributs comme le temps d'attente, la largeur de bande, et la perte de paquets qui est relié directement avec le type de service du réseau ;
- **La durée de vie** : c'est la durée pendant laquelle le réseau reste opérationnel. On s'attend à ce que le RCSF puisse fonctionner au moins pendant le temps requis pour accomplir la tâche donnée ;
- **La maintenance** : les changements dans l'environnement du réseau, par exemple, l'apparition de nœuds capteurs avec des batteries épuisées, exigent une solution permettant l'adaptation et le maintien des services du RCSF ;
- **La programmation flexible** : c'est la capacité des nœuds capteurs à modifier les options de traitement des données acquises et à effectuer des changements et des ajustements de leurs tâches [26].

### II.3.1. Classification des RCSFs

La conception d'un RCSF oriente application. En conséquence, les architectures, les protocoles et les algorithmes des réseaux de capteurs varient cas par cas. Cependant, différents RCSF ont des propriétés en commun.

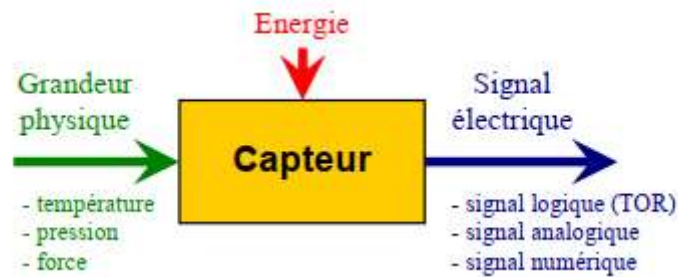
Ces réseaux peuvent être classifiés en catégories basées sur plusieurs critères, nous citons :

- Selon la distance qui sépare un nœud de capteurs de la station de base, le RCSF peut être un réseau à un seul saut ou à multi-sauts [1].
- Selon la mobilité des nœuds, les RCSFs peuvent être mobiles ou stationnaires. Un réseau mobile est constitué d'un ensemble de nœuds capteurs mobiles évoluant dans un environnement statique.
- Selon la densité des nœuds capteurs, un RCSF peut être classifié en un réseau agrégeant ou non agrégeant. Dans ce dernier, toutes les données d'un seul nœud seront envoyées à une destination [1,29].

- Un RCSF peut être homogène ou hétérogène. Dans la classe homogène, tous les nœuds du réseau sont identiques et partagent une même complexité matérielle. [1,30].

En cas général, un capteur est un organe de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

Chaque capteur d'un réseau hétérogène est capable de détecter et mesurer différents phénomènes physiques (température, pression, humidité) et générer ainsi un trafic avec des caractéristiques spécifiques, différentes d'un capteur à l'autre.



**Figure II.1-Capteur**

### II.3.2. Type des capteurs sans fil

Généralement on distingue plusieurs types essentiellement les capteurs codeur, mécanique, électrique, pneumatique, électromagnétique, magnétomètre et autres. Les trois derniers types sont très utilisés notamment pour la gestion du trafic routier, mais on peut classer en deux catégories comme :

- Capteur instructif ;
- Capteur non instructif.

Dans notre mémoire nous allons se baser sur le capteur magnétomètre sans fil, ce capteur est utilisé par des nombreux auteurs comme [56,42] dans la gestion de trafic routier où leur principe de fonctionnement basé sur trois (3) axes x, y, et z, et permet la détection en temps réel lorsqu'un véhicule ou un Véhicule métallique rentre dans le périmètre de détection, il vient perturber le champ magnétique [43].

- **Capteur instructif**

Les capteurs instructifs sont des capteurs placés sur ou dans la chaussée. Leur mise en place nécessite la fermeture de la voie concernée. Les systèmes intrusifs offrent généralement une détection ponctuelle. Ils nécessitent une installation plus longue, car ils sont situés directement sur (ou sous) la chaussée. De plus, certains de ces systèmes nécessitent une alimentation indépendante, ce qui complique leur mise en place. En pratique, l'exemple le plus utilisé est la boucle électromagnétique, constituée de plusieurs spires de cuivre enfouies dans la chaussée : elles permettent de mesurer les variations d'inductance lorsqu'un véhicule passe à proximité, La détection de véhicule devient possible, mais également leur classification en fonction de l'importance des variations, ou la mesure de leur vitesse [32].

- **Capteur non-instructif**

Les capteurs non-instructif sont les capteurs les plus utilisés dans la gestion de trafic routier, mais ne nécessitent pas d'être placés sur ou dans la chaussée. Ils sont positionnés en bordure de la chaussée, sur des mâts, sur des portiques ou en dessous des ponts. Les catégories de ce capteur non-instructif les plus utilisés sont : Capteur vidéo, Capteurs infrarouges, Capteurs micro-ondes, Capteurs acoustiques, etc.

Les systèmes non-intrusifs sont souvent volumineux et leur efficacité dépend des conditions environnementales. Ils sont généralement installés sur le côté de la chaussée. Les équipements les plus fréquents entrant dans cette catégorie sont les radars Doppler, laser, à ondes ultrasoniques, micro-ondes ou encore acoustiques.

Des solutions tout aussi courantes sont les dispositifs de traitement d'images, filmant directement la circulation [31, 32].

### II.3.3. Capteur a bouclé inductif

La boucle inductive figure II.2 a fait son apparition dans les années 1960 en tant que capteur de trafic. Depuis, ce capteur est toujours utilisé et est l'un des plus répandus en Europe [4] et aux États-Unis [45] pour la gestion du trafic. Les principaux composants de ce capteur sont :

- Une boucle d'une ou plusieurs spires de fil conducteur implantée dans le revêtement de la chaussée ;
- Un fil d'entrée de la boucle qui relie soit directement la boucle au détecteur soit la boucle à une boîte de jonction ;
- Un câble de liaison quand celui-ci est nécessaire pour relier la boîte de jonction au détecteur ;
- Un détecteur électronique stocké dans une armoire électrique en bordure de la chaussée.

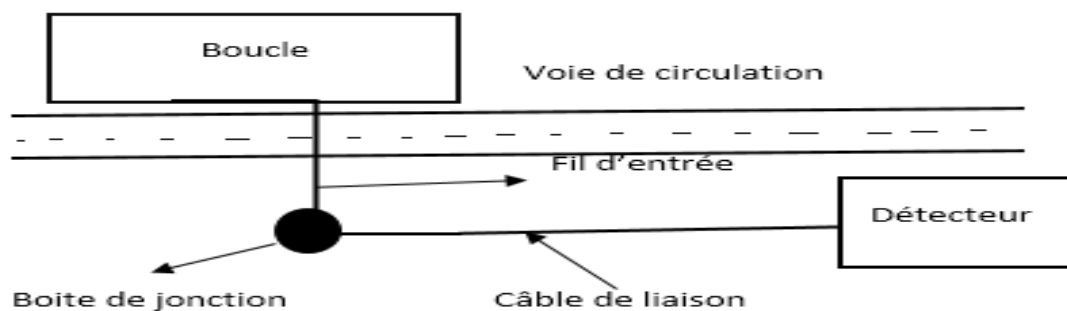


Figure II.2-Composant de boucle inductive

### II.4. 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 [16].

### II.4.1. Capteur magnétomètre sans fil

Un capteur magnétomètre est un dispositif électronique équipé de capteurs qui mesurent le champ magnétique terrestre suivant les axes X, Y et Z à une fréquence de 128 Hz. Lorsqu'un véhicule rentre dans le périmètre de détection, il vient perturber le champ magnétique de référence et le capteur détecte ces variations. En l'absence de véhicules, les capteurs mesurent en permanence le champ magnétique local et s'auto-étalonne automatiquement à cette référence magnétique [27].

Le système de détection de véhicules sans fil (Sensor system) en anglais utilise des magnétomètres insérés dans la chaussée pour détecter la présence et le passage des véhicules. Ces capteurs sans fil transmettent leurs données de détection en temps réel par onde-radio à un concentrateur raccordé à un centre de gestion trafic et/ou un point de contrôle. Ces variations permettent avec une très grande fiabilité de : Détecter des véhicules, Estimation de vitesse des véhicules et Enregistrer l'heure d'arrivée des véhicules.

Ils utilisent comme source soit l'énergie de la batterie soit l'énergie solaire. Ils sont capables de tirer profit de la lumière solaire et de l'utiliser dans les bonnes conditions climatiques (dans les journées claires et lumineuses) et quand le temps est nuageux ou durant la nuit ils fonctionnent à base de la capacité de la batterie.

Les principales fonctionnalités du capteur sont :

- Magnétomètre à 3 axes destiné à la détection de véhicules pour comptage ou détection de présence ;
- Capteur sans fil pour installation dans la chaussée à fleur ou enterré jusqu'à 11 cm. Les capteurs enterrés ne sont plus visibles pour la maintenance c'est comme contraintes ;
- Pose simple et rapide avec une durée de fermeture de voie minimum. Pas de sciage de la chaussée ;
- Conception mécanique robuste avec une durée de vie de la batterie de 10 ans ;
- Utilise un étalonnage automatique ne nécessitant pas de calibrage manuel ;
- Communication radio robuste avec le concentrateur en direct ou au travers de répéteurs. Chaque capteur est adressé individuellement avec une adresse hexadécimale inscrite sur sa face supérieure ;
- Firm ware pouvant être mis à jour à distance.

### Spécification radio

<b>Protocole PHY</b>	<b>IEEE 802.15.4 PHY.</b>
Protocole de transmission	Protocol TDMA Sensys Networks Nano Power (SNP).
Modulation	Étalement du spectre en séquence directe, modulation par déplacement de phase quadrivalente décollée (DSSSO-QPSK).
Débit	250 kbps.
Bande de fréquence	2 400 à 2 483,5 MHz
Canaux de fréquence	16
Bande passante	2 MHz
Type d'antenne	Antenne patch avec technologie microstrip (derrière le panneau de la face avant).
Champ de portée de l'antenne	$\pm 60^\circ$ (azimut et élévation)
Puissance de sortie nominale	3 dBm
Sensibilité de réception nominale	-101 dBm
Saturation (niveau d'entrée max)	$\geq 10$ dBm

<b>Principe de détection</b>	<b>Déformation du champ magnétique (3 axes).</b>
Fréquence échantillonnage	128 Hz
Seuils de détection	Seuil de détection axe Z. Seuil de non-détection axe Z. Seuil de non-détection axe X. Temps d'activation (ms). Maintien détection (ms). Délai d'auto-étalonnage (s).
Modes de fonctionnement	Comptage. Macro-régulation. Micro-régulation.



**Figure II.3-Capteur électromagnétique sans fil 5003E**

#### **II.4.2. Caméra de détection d'un Véhicule**

Une caméra de surveillance routière est un système de contrôle de la circulation routière en vue d'obtenir une image captée en temps réel. S'il y a des feux de circulation dans l'intersection routière il va indiquer la présence d'une boucle d'induction magnétique sous la route. Les caméras de détection sont fixées sur de poteau et sur des barres transversales aux intersections, près des feux tricolores pour détecter les véhicules qu'ils ont à la file d'attente et envoyer un signal détecté pour que le contrôleur des feux déclenche les feux vert ou rouge même orange en fonction de données reçues [68]. Elle peut être de deux types : pour détecter une infraction routière et pour détecter un incident ou un accident sur le réseau routier.

- **Détection d'une infraction routière**

Parmi les dispositifs les plus courants :

- La caméra de surveillance en réseau, telles qu'il en existe dans les grandes agglomérations où les images sont centralisées vers un PC comme dans le point de contrôle gérer par la Police routier.
- La caméra de carrefour pour identifier les véhicules franchissant un carrefour alors que le feu est rouge. Ces caméras permettent aussi de mesurer les véhicules en file d'attente d'un passage au carrefour.

- **Détections d'incident**

Les caméras reliées très proches de feux de circulation et envoyées le signal au point de contrôle chargé de la surveillance d'un réseau routier. Les véhicules détectés sont souvent traités par des algorithmes de traitement d'images numériques permettant de détecter automatiquement un incident. Les principaux incidents détectés par traitement d'images sont : un embouteillage, un véhicule arrêté sur la chaussée et un incendie d'un véhicule.



**Figure II.4-camera de détection reliée par feu de circulation**

## **II.5. Architecture du réseau de capteur**

### **II.5.1. Architecture d'un nœud**

La figure II.6 reprise [42,52] fournit une vue globale d'une architecture typique pour un nœud capteur. Un nœud capteur peut être divisé en quatre unités de base :

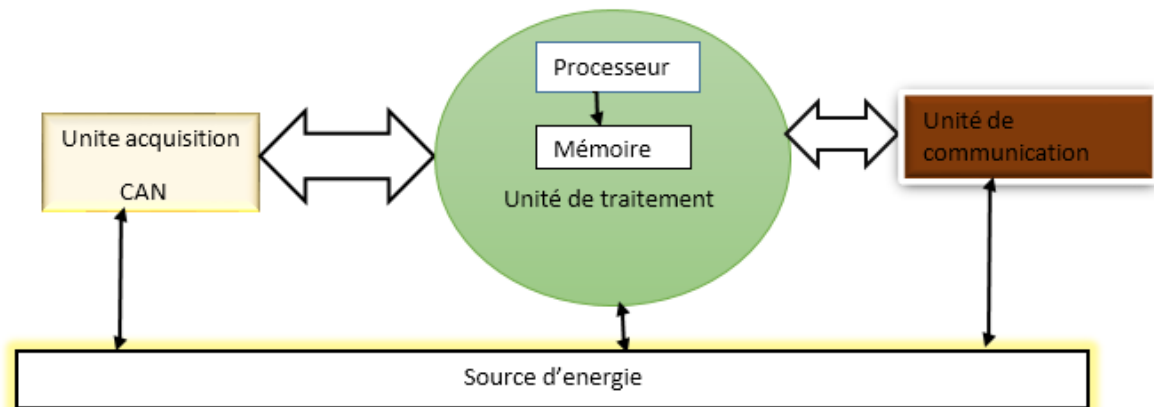
- Captage ;
- Traitement ;
- Communication ;
- Contrôle d'énergie.

Nous donnons les rôles de chaque unité du capteur :

L'unité de captage englobe généralement deux sous-unités : le capteur lui-même et un convertisseur analogique-numérique (CAN) 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 [46]. 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. Donc afin d'étendre la durée de vie du capteur et donc du réseau, les nouveaux capteurs intègrent une unité de gestion de l'énergie [45].



**Figure II.5-Composantes d'un nœud du capteur**

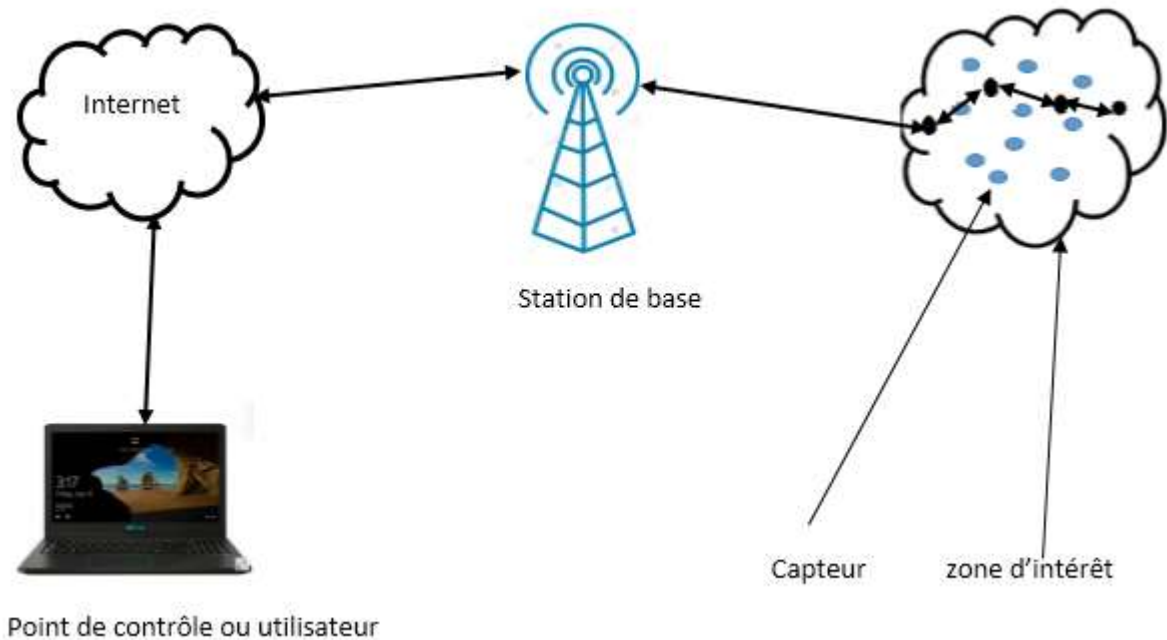
Le rôle de chaque capteur est de récolter un ensemble de données dans son environnement, et le transmettre de proche en proche jusqu'à atteindre généralement une station de base, qui peut jouer le rôle de coordinatrice du réseau et communiquer vers l'extérieur les données importantes recueillies. L'utilisation de tels réseaux est répandue dans de nombreux domaines et applications : nous pouvons par exemple citer la surveillance de forêts, d'infrastructures critiques, ou encore la détection d'agents biochimiques dans le secteur militaire.

### II.5.2. Architecture de communication d'un réseau de capteurs

L'architecture du réseau de capteurs est montrée dans la figure II.7. L'utilisateur accède à distance aux données capturées à travers un nœud appelé le nœud directeur ou principale de tâche "*Task Manager Node*". Le nœud directeur de tâche est relié à l'Internet à travers un nœud destinataire appelé puits "*sink*"[58].

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 données, 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 [42].



**Figure II.6- Architecture de Communication dans un RCSF**

### II.5.3. Caractéristiques principales d'un RCSF

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 ( $R_s$ ). 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.

#### **II.5.4. Domaines d'application d'un RCSF**

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

Le champ d'applications des réseaux de capteurs est de plus en plus élargi grâce aux évolutions techniques que connaissent les domaines de l'électronique et des télécommunications [20].

##### **Applications militaires**

Un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis) ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [25].

##### **Applications médicales**

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

##### **Applications environnementales**

Pour améliorer la connaissance de l'environnement et surtout signaler d'éventuels problèmes y afférant (incendie, pollution, épidémies, aléa météorologique...), il est possible de répartir, dans la zone considérée, des thermo-capteurs formant un RCSF et offrant ainsi la possibilité d'une surveillance et une meilleure efficacité des moyens de lutte. 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 [53].

### **Applications commerciales**

Il est possible d'intégrer des capteurs au processus de stockage et de livraison dans le domaine commercial. Le réseau ainsi formé pourra être utilisé pour connaître la position, l'état et la direction d'un paquet. Il devient alors possible pour un client qui attend la réception d'un paquet, d'avoir un avis de livraison en temps réel et de connaître la localisation actuelle du paquet [16].

### **Applications sur la surveillance**

L'application des réseaux de capteurs dans le domaine de la sécurité peut diminuer considérablement les dépenses financières consacrées à la sécurisation des lieux et des êtres humains. Ainsi, l'intégration des capteurs dans de grandes structures telles que les ponts ou les bâtiments aidera à détecter les fissures et les altérations dans la structure suite à un séisme ou au vieillissement de la structure.

### **Applications sur le transport**

Les nouvelles technologies apportent une assistance importante aux collectivités locales dans la mise en place d'un contrôle efficace notamment lorsqu'il s'agit de stationnement réglementé. L'information sur le stationnement des véhicules sur le réseau autoroutier fait partie des priorités inscrites dans la directive des transports intelligents [6].

## **II.6. Structure de communication d'un réseau capteur sans fil**

Après avoir énuméré, ci-haut les domaines d'application du RCSFs, un RCSF est ainsi constitué de nœuds qui communiquent entre eux et avec une station de base. Un nœud de capteur constitue un exemple significatif de système embarqué temps réel, celui-ci recevant des données de son environnement via un ou plusieurs capteurs physiques qui lui sont attachés. Par capteur physique, on entend un instrument qui mesure une grandeur physique et la transforme en une grandeur numérique. La Figure 8 montre la structure de communication d'un système de capteur sans fil.

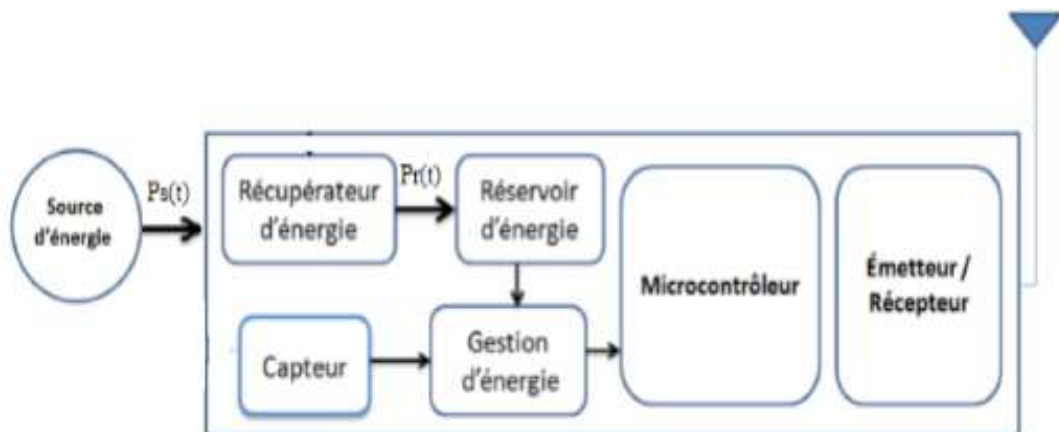
Un système de capteur sans fil est constitué de trois éléments principaux : le récupérateur d'énergie, le réservoir d'énergie et le microprocesseur. Le récupérateur d'énergie a pour rôle de récupérer l'énergie délivrée par une source (par exemple le soleil) pour ensuite la convertir en énergie électrique. Cette énergie électrique va recharger un réservoir d'énergie. Ce réservoir peut être une batterie ou un super-condensateur et est caractérisé par sa capacité, notée  $C$ . Nous supposons qu'il est idéal dans le sens qu'il peut toujours être chargé à sa capacité maximale. A tout instant  $t$ , l'énergie stockée dans le réservoir est notée  $E(t)$  et sa valeur est bornée par deux constantes telles que  $0 \leq E(t) \leq C$ .

L'énergie reçue par le réservoir pendant un intervalle  $[t_1; t_2]$  est notée  $E_r(t_1; t_2)$  et se calcule comme suit :  $E_r(t_1; t_2) = \int_{t_1}^{t_2} pr(x) \cdot dx$

$C$ : capacité;

$E(t)$ : Energie stockée;

$Pr(x)$ : Puissance instantanée.



**Figure II.7-Structure de communication RCSF**

Où  $Pr(x)$  est la puissance instantanée reçue à l'instant  $x$  incluant toutes les pertes d'énergie occasionnées par la mise en œuvre matérielle du processus de récupération de l'énergie. L'alimentation d'un nœud de capteur (appelé simplement capteur) constitue un point primordial. Son choix dépend non seulement des caractéristiques matérielles du capteur mais aussi des différents traitements qu'il aura à effectuer. La plupart des RCSFs sont utilisés dans des secteurs hostiles où l'humain ne peut y accéder facilement (satellite dans l'espace, fonds marins, environnements nucléaires, etc..).

Par conséquent, recharger ou remplacer une batterie se révèle pour la plupart des applications une tâche sinon impossible tout du moins extrêmement onéreuse et périlleuse. D'où l'importance de bien estimer l'énergie nécessaire pour permettre le bon fonctionnement du système et d'assurer son autonomie sur une très longue durée sans intervention extérieure. Ainsi, on pourra se satisfaire de six mois à un an comme durée d'autonomie pour certaines classes de systèmes tels que des capteurs médicaux non intrusifs. Par contre, une telle durée sera jugée insuffisante pour d'autres applications compte tenu des coûts et des risques associés au remplacement des batteries. C'est la raison pour laquelle depuis quelques années, on s'oriente vers un procédé qui consiste à ne jamais changer de batterie sachant que celle-ci peut se recharger en continu à partir de l'environnement [18 ,9]. La récupération de l'énergie ambiante (Energy Harvesting en anglais) est de plus en plus répandue dans les RCSFs, l'environnement offrant de multiples sources d'énergie. Cette technique consiste à associer au système consommateur d'énergie, un réservoir d'énergie assurant le stockage temporaire de l'énergie récoltée par l'environnement. La mise place d'une telle technologie nous amène à décrire un système embarqué sous forme de trois composants qui sont : Le récupérateur d'énergie, réservoir d'énergie permettant le stockage d'énergie (batterie et/ou super-condensateur) et le consommateur d'énergie (le système informatique) [18].

## **II.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 pour communiquer entre le nœud directeur de tâche et relié au RCSFs à travers un nœud destinataire jusqu'au point de contrôle afin de résoudre la problématique de la régulation du trafic urbain. La présentation de ces derniers est l'objectif du chapitre suivant.

## **CHAPITRE III : GESTION DE TRAFIC ROUTIERE**

### **III.1. Introduction**

Le transport routier est un élément fondamental dans le fonctionnement des sociétés modernes et du pays en général. En effet, des millions de véhicules transportent des personnes et des marchandises dans les heures de pointe 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, leurs applications pour gérer la circulation routière sans oublier le modèle mathématique file d'attente pour faire face à ces problèmes lieu à congestion routière [18].

### **III.2. Congestion urbaine**

Pour plusieurs grandes villes dans le monde, le trafic routier et la congestion font partie du quotidien et toute laisse à croire que la situation n'ira pas en s'améliorant au cours des prochaines années. En effet, le trafic routier est un phénomène complexe d'une part en raison du nombre élevé d'acteurs qui y participent, d'autre part à cause du caractère très maillé du réseau sur lequel il se déroule [39]. Le phénomène le plus marquant dans le trafic routier est la congestion qui alimente de nombreuses discussions d'usagers. Pour mieux comprendre la congestion, il faut garder présent à l'esprit que c'est un phénomène qui survient lorsque la demande c'est-à-dire le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée est supérieure à la capacité de l'infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure (telles que les intersections), formant ainsi un bouchon. Ces véhicules excédentaires seront à chaque instant plus nombreux qu'à l'instant précédent.

Au fil des années, ces systèmes se sont diversifiés, et ont connu trois générations de contrôles. Aujourd'hui, ces générations peuvent être utilisées chacune en fonction des moyens mis en place sur l'infrastructure, et de la connaissance de cette dernière : la Première génération contrôle à temps fixe : en fonction de l'heure et parfois du jour, le système va utiliser un plan de feux prédéfini ; la deuxième génération contrôle à temps dynamique : des détecteurs sont utilisés afin de recueillir les données du trafic toutes quelques secondes,

Ces données peuvent être utilisées afin d'optimiser ou mettre en place un plan de feu et la troisième génération contrôle temps réel : reprend le même principe que la deuxième génération mais cette fois-ci en temps réel.

Notons que les deux dernières générations, qui introduisent un caractère dynamique au système peuvent être chacune décomposées en deux types : Contrôle réactif : en fonction des données recueillies sur le terrain périodiquement (plusieurs minutes ou cycles), le système met en place une nouvelle configuration en réponse aux informations reçues. Cette méthode est le premier niveau de dynamique, et est simple à mettre en place, mais nécessite toutefois une très bonne connaissance du système afin d'être efficace. C'est également la première méthode à être apparue aux Etats-Unis à la fin des années 1980 avec l'apparition des UTCS (Urban trafic control software) et Contrôle adaptatif : ce type de contrôle va programmer dynamiquement les plans de feux en se servant des paramètres recueillis sur le terrain, ceci en calculant des valeurs telles que le temps de cycle, des phases ou encore leur ordonnancement.

### **III.2.1. Définition de congestion routière**

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 [15].



**Figure III.1-Image de l'embouteillage sur intersection RN1**

### **III.2.2. Nature de la congestion routière dans la ville**

Après l'analyse de la situation de trafic au centre-ville de Bujumbura où les causes de congestion sont multiples a sa voir:

- la congestion récurrente;
- La congestion incidente.

La congestion récurrente se produit principalement lorsqu'un trop grand nombre de véhicules utilisent le réseau routier en même temps. Typiquement, la congestion récurrente 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 centre-ville de Bujumbura, la période de pointe s'observe généralement entre 6h30 à 9h30 du matin, et entre de 17h45 à 19h30 en après-midi. Dans les villes urbaines plus petites, la période de pointe s'étend normalement sur une période plus courte [50].

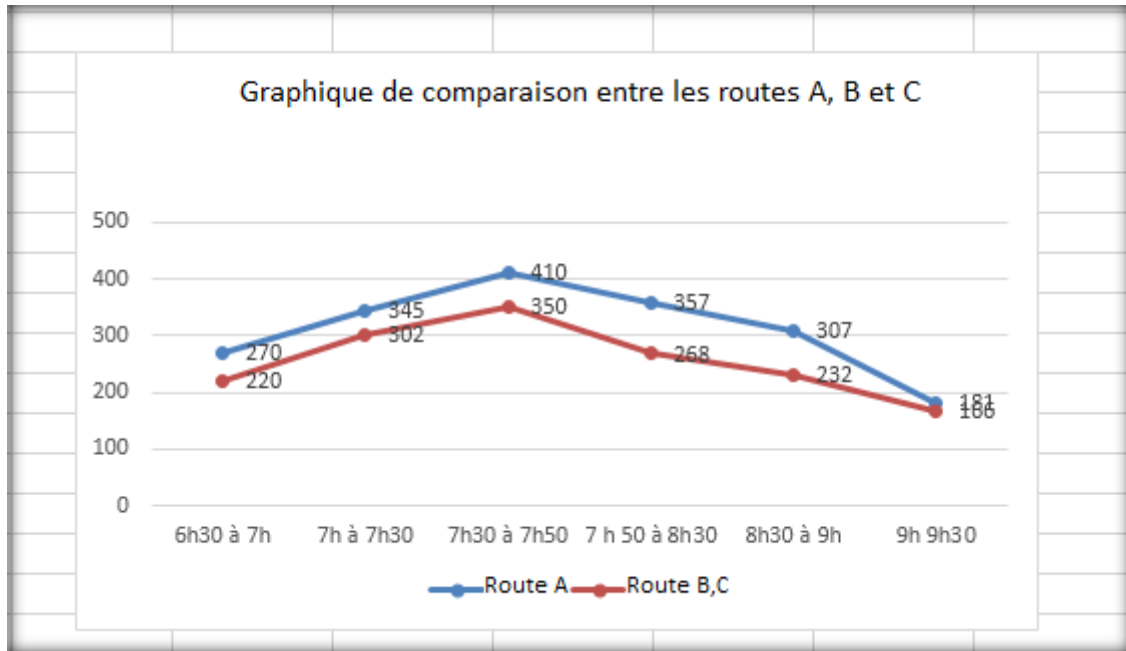
- **Congestion incidente**

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 et les événements spéciaux.

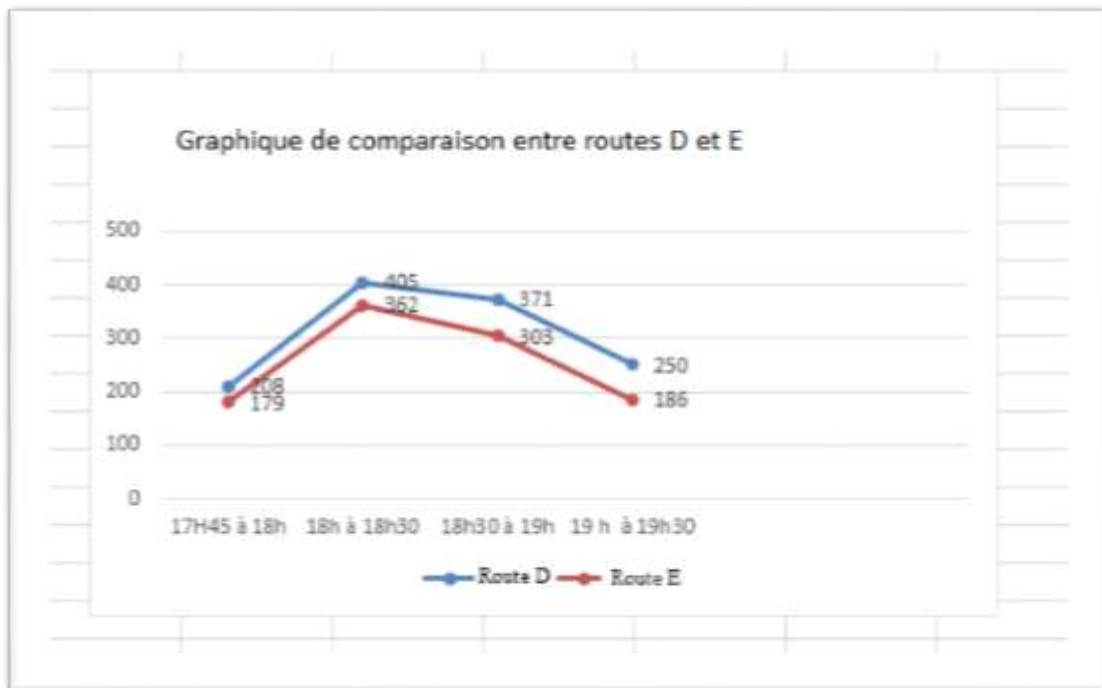
En raison du caractère aléatoire de ce type de congestion, elle est plus difficile à prévoir, à quantifier et à gérer. Les répercussions de la congestion incidente sont significatives. En effet, la fiabilité et la prévisibilité des temps de déplacement revêtent une très grande importance pour le public, les industries qui ont recours au transport de marchandises qui doivent respecter les délais de livraisons.

### **III.2.3. Causes de l'émergence du problème de la congestion**

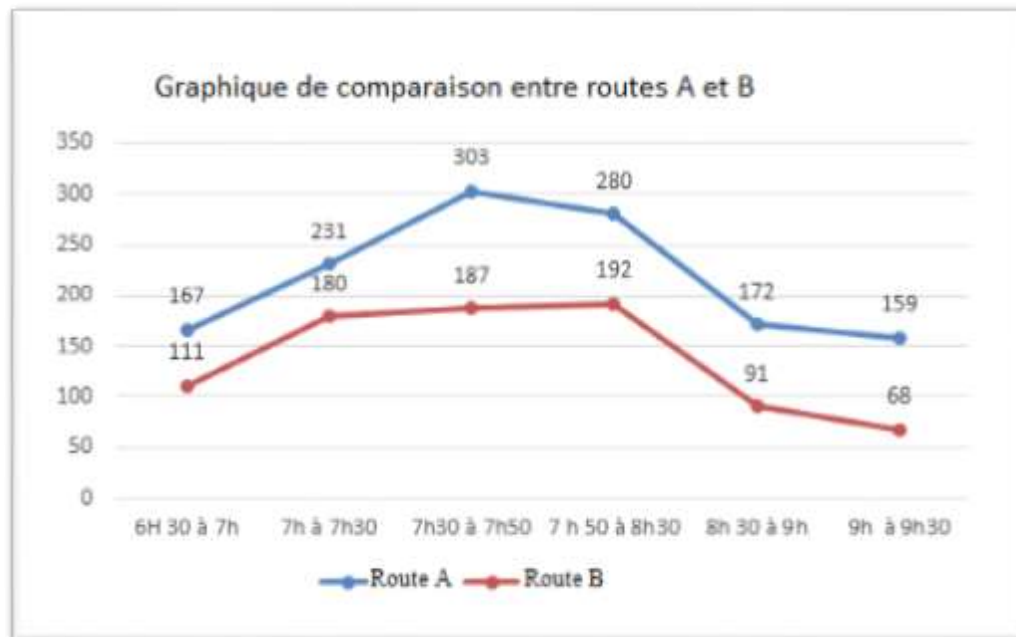
La congestion urbaine vient principalement de l'augmentation massive du nombre de véhicules personnels, augmentation des populations sans écartement des villes comme nous le montre dans le tableau [I.1]. Les infrastructures routières ont vite atteint leurs capacités maximales et la construction de nouvelles routes est limitée par des contraintes politiques, économiques, sociales et environnementales. La congestion routière est devenue un problème chronique. On en impute aussi parfois la cause de celle-ci aux travaux routiers récurrents qui créent des entraves à la bonne circulation. De plus, quand les voitures sont proches les unes des autres, il suffit qu'un conducteur freine brutalement pour faire freiner en cascade tous les véhicules qui le suivent et propager ainsi un ralentissement. Outre, plusieurs événements peuvent provoquer ou aggraver la congestion, nous citons par exemple : les accidents, les voitures en panne, les stationnements gênants, les conditions météorologiques mauvaises [la graphique III. 1, 2, 3] nous montre l'état d'augmentation des véhicules pour les routes A et B, C.



**Figure III.2-Graphique de comparaison entre routes A et B, C sur l'intersection RN1 dans l'avant midi**



**Figure III.3-Graphique de comparaison entre routes D et E sur l'intersection RN1 dans l'après-midi après le travail**



**Figure III.4-Graphique de comparaison entre routes A et B sur l’intersection de Nations unis RN 9 dans l’avant-midi**

### III.2.4. Conséquence de la congestion routière dans la ville

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’aboutissement 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. On peut citer quatre catégories de conséquences [39]: conséquences économiques, conséquences environnementales, conséquences sur la sécurité routière sans ignore la conséquence sociales et structurelles.

### III.2.5. Avantages du contrôle du trafic

Le contrôle du trafic est un rôle important dans l’exploitation du réseau. Les systèmes avancés font appel à des technologies de communication avancées et à des logiciels en temps réel, en vue d’accroître la sécurité et d’améliorer le débit de la circulation.

Parmi les solutions, nous mentionnons la gestion de trafic intelligente, la détection de véhicules, le contrôle adaptatif des feux de circulation.

### **III.3. 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 [39].

#### **III.3.1. Gestion des feux de circulation**

Dans cette section nous menons notre étude sur les systèmes de gestion des feux de circulation dans le centre-ville pour trois intersections que nous avons énumérés dans l'introduction général de notre travail.

#### **III.3.2. Contrôleur de feux**

Les feux de circulation d'une intersection sont généralement gérés par un point de contrôle, qui possède un certain nombre de propriétés en fonction des constructeurs. Un contrôleur n'est rattaché qu'à une seule intersection. Les principaux éléments d'un contrôleur sont les suivants : une unité d'énergie, une unité de détection, connectée à des éléments de contrôle (par détecteurs par exemple une cameras et capteur magnétomètre sans fil), unité de contrôle, donnant l'ordre d'enclenchement des feux, Une unité d'avertissement rapide, réagissant en cas d'erreur ,une unité de gestion des conflits, qui est programmée avec les combinaisons de feux verts autorisés (matrice de conflits) et qui vérifie les données envoyées par l'unité de contrôle qui fait appel à l'unité précédente en cas d'erreur ou de faute constatée sur l'un des feux et une unité d'administration, pour prendre le contrôle de l'intersection (par la police routière par exemple).

#### **III.3.3. Phase de feux de circulation**

Par définition une phase consiste en la description des différentes transitions possibles que les véhicules peuvent effectuer pour chaque voie de l'intersection. Les phases décrivent aussi les lumières qui doivent être affichées aux véhicules pour leur indiquer les droits de passage [5, 21].

### III.3.4. Cycle de feu

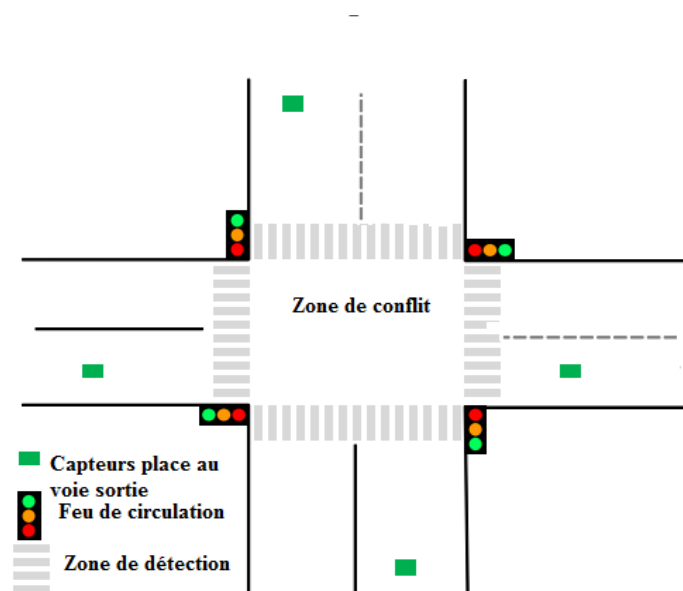
Un cycle correspond à l'enchaînement d'un ensemble de phases. Ce cycle est généralement fixé au minimum à 45 secondes et ne dure pas plus de 90 secondes pour éviter de perdre du temps à arrêter et redémarrer le trafic. Classiquement, un cycle déroule l'ensemble des phases et mouvements possibles, de manière à ce que toutes les voies aient au moins une fois le feu au vert [5,29].

### III.3.5. Détecteur des véhicules

Un détecteur est une technologie permettant de récolter et transmettre des informations à un nœud traitant [29]. Ce terme englobe donc les capteurs magnétomètre sans fil et la caméra comme éléments essentiels de détection de véhicules en temps réel dans notre travail.

### III.3.6. Plan de signalisation

Un plan de feux correspond à la description d'un cycle donné, et définit les différentes phases que le cycle va dérouler ainsi que leur durée.



**Figure III.5-Exemple d'une Intersection isolée avec feu de circulation**

### **III.3.7. Types de contrôle des feux de signalisation**

La gestion des feux de circulation est un problème qui a commencé à être étudié au début des années 1970. Il existe deux façons différentes de gérer les changements de phases d'un plan de signalisation : régulation à plan de feux fixe et régulation adaptative. Les contrôleurs à temps fixe sont intuitivement simples et fonctionnent avec l'heure de la journée. Ce choix de contrôle est moins coûteux et plus logique pour un réseau routier où le trafic est stable et prévisible. L'inconvénient majeur de celui-ci est que son efficacité peut devenir très faible lorsque le flux du trafic est instable [39].

### **III.4. Régulation du trafic avec les systèmes adaptatifs**

Dans les techniques temps réel, le système doit être capable de s'adapter immédiatement aux conditions du trafic, et d'optimiser le contrôle des feux. A partir de 1960, plusieurs algorithmes ont été proposés par beaucoup d'auteurs et ces derniers sont utilisés dans les grandes villes pour améliorer le passage des flux de véhicules et la gestion du trafic routier. Nous citons quatre (4) systèmes différents, TRANSYT, SCOOT, SCATS et PRODYN, sont décrits pour montrer la diversité de ces approches classiques.

Ils s'intéressent tous à la gestion du trafic dans les réseaux fixes ou sans fil sans être centralisés à l'exécution. Nous nous sommes appuyés dans cette section sur l'approche qui présente une synthèse de ces différents systèmes de gestion de trafic routier.

#### **III.4.1. Traffic Network Study Tool**

En résumé, TRANSYT est un système centralisé et n'est pas adaptatif au trafic. Une application réussie de ce modèle nécessite un calibrage approprié des paramètres du modèle. Plus précisément, l'auteur de la thèse [33] montre qu'un étalonnage précis des paramètres est essentiel pour le développement de plans de synchronisation efficaces.

Ces systèmes reposent sur une optimisation hors-ligne qui génère des plans de coordination optimaux entre les feux de signalisation d'un réseau pour une période donnée. TRANSYT exige beaucoup de paramètres d'entrées, comme : la géométrie des artères des intersections, le débit des véhicules, taux de véhicules sur chaque voie sortante de chaque intersection, taux de véhicules sur chaque voie entrante de chaque intersection, temps de feu vert

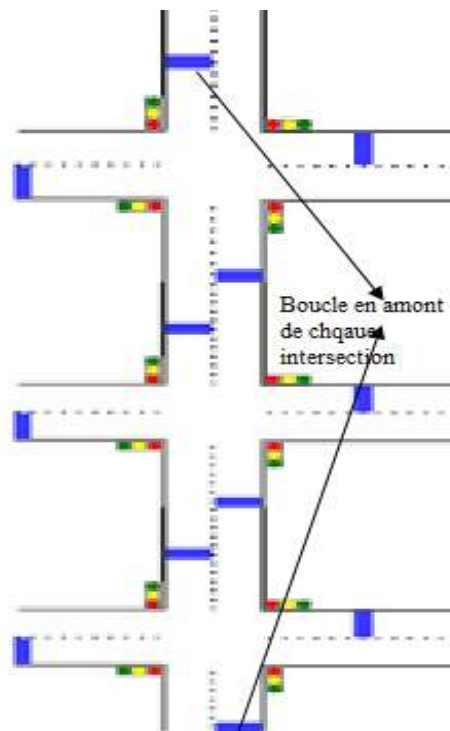
minimal et les plans de feux initiaux et des valeurs initiales pour les durées des cycles et les déphasages.

### III.4.2. Split Cycle And Offset Optimisation Technique

Le principe de fonctionnement de SCATS repose sur la modification graduellement des plans de feux de signalisation en cours d'exécution en fonction des données collectées par les capteurs installés en amont sur les routes. SCATS est un système décentralisé et complètement adaptatif à la situation du trafic.

Il optimise : les durées de feu vert pour chaque intersection indépendamment, les décalages entre intersections voisines et les cycles des feux entre les zones d'intersection.

Il collecte les données (nombre de véhicules pour chaque voie par intervalle de temps) grâce à un capteur installé sur les routes, magnétomètre et boucle magnétiques en amont du carrefour [34].



**Figure III.6-Exemple Boucles magnétiques en amont et en avant de l'intersection**

### **III.4.3. Programmation Dynamique**

PRODYN (Programmation Dynamique) est un système décentralisé et adaptatif au trafic développé par le Centre de Régulation de Trafic [34].

L'objectif de PRODYN est d'optimiser la circulation en ligne en minimisant les retards aux intersections sur un horizon futur de 80 secondes. La fréquence de modification des phases et des durées des feux est fixée à 5 secondes. Il utilise la programmation dynamique pour minimiser les retards en s'appuyant sur un modèle d'écoulement du trafic sur tout l'horizon. Ce dernier lui permet d'exprimer l'évolution des files d'attente en fonction des arrivées et des départs sur les tronçons. Il est installé dans beaucoup de villes en France, Belgique et en Australie, mais il reste un système relativement complexe en termes de calcul et coûteux en communication.

### **III.4.4. Split Cycle Offset Optimisation Technique**

SCOOT est un système de contrôle de trafic développé par le TRL (Traffic Research Laboratory, en Angleterre). À l'aide de détecteurs placés sur la rue, SCOOT se base notamment sur un indice de performance afin de générer des plans de feux en fonction de la demande des utilisateurs. Cet indice est calculé par rapport au délai d'attente moyen, à la longueur des files d'attente et des arrêts sur le réseau. Cet aspect dynamique est réalisé à l'aide d'un aller-retour régulier de mesures et de décisions entre les équipements sur le terrain et un centre de contrôle [33].

## **III.5. Système de Transport Intelligent dans la ville**

### **III. 5.1. Introduction**

Le système de transport routier pose de graves problèmes qu'il faut à tout prix chercher à réduire leur impact sur la société. L'un des problèmes majeurs est celui de l'accident que l'utilisateur peut occasionner en conduisant une automobile. Cette problématique pourrait être résolue par la mise en application des Systèmes de Transport Intelligents (STI) [29]. A la fin du XXème siècle, les chercheurs ont introduit l'intelligence dans les systèmes de transport, ce qui a donné naissance à un nouveau domaine de recherche dénommé « Systèmes de Transport Intelligents ». A leurs débuts, les initiatives étaient limitées par la

télesurveillance sur les incidents de la circulation à l'aide de caméras pour en informer les utilisateurs via des panneaux à messages. Les STI sont ces nouvelles technologies appliquées aux réseaux de transport pour en améliorer la gestion et l'exploitation, aussi bien que les services aux utilisateurs. En effet, un STI collecte, stocke, traite, et distribue des informations relatives à l'état d'une infrastructure [23].

### **III.5.2. Contexte et applications au milieu urbain**

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

### **III.5.3. Domaines d'application de STI**

Les STI apparaissent comme une réponse possible à un certain nombre de défis spécifiques au domaine de la mobilité. Plus généralement, les STI pourraient contribuer à l'amélioration des performances des transports au regard des critères du développement durable, que ce soit sur le plan environnemental, sécuritaire, gestion de la congestion, productivité et efficacité, voire même dans le cadre de l'information des voyageurs et de leur confort [53].

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

À l'échelle mondiale, l'utilisation de véhicules motorisés ne semble toujours pas diminuer et la circulation routière continue de s'accroître. Par conséquent, l'impact des émissions et du bruit sur l'environnement a continué de s'aggraver. Il est clair qu'il est urgent que le secteur du transport prenne des mesures pour améliorer l'environnement, en particulier pour réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) et mieux gérer la circulation urbaine et interurbaine [28].

## **Sécurité et sûreté**

Les services de STI peuvent rendre le transport plus sûr et plus sécuritaire. Ils peuvent maximiser sa capacité à contrôler et à réduire les impacts des désastres, tant naturels que d'origine humaine. Grâce à une planification bien pensée, à la réduction des délais d'intervention des services d'urgence, et à la création d'itinéraires d'évacuation en cas de désastre et à l'établissement de la priorité d'accès à ceux-ci. Ils peuvent favoriser une réduction durable du nombre d'accidents et de la gravité de ceux-ci en signalant les conditions et les situations dangereuses aux voyageurs [49,50].

### **III.6. Fonctions et Application des STI à l'exploitation des réseaux**

#### **III.6.1. Application des STI à l'exploitation des réseaux routières**

Parmi les principales fonctions d'exploitation du réseau liées aux STI nous avons cités :

**La Surveillance du réseau** : c'est l'une des fonctions primaires de la collecte d'information en temps réel sur le réseau routier et du soutien des autres activités d'exploitation du réseau.

**Le maintien de la viabilité** : des mesures proactives et réactives peuvent être déployées afin d'améliorer la viabilité. Les mesures proactives mettent la priorité sur la prévention des incidents et de la congestion. Les mesures réactives mettent la priorité sur la détection et la vérification des incidents et des conditions routières dangereuses ;

**Le maintien de la sécurité routière et le contrôle du trafic** : la sécurité routière ne peut être assurée qu'au moyen de mesures préventives. Il est important de surveiller constamment l'état de la route et de la circulation, et de réagir aux situations ;

**Fournir des informations d'aide aux déplacements et aux usagers** : c'est une mesure de prévention secondaire. La diffusion d'avertissements en temps réel, quant aux conditions de circulation dangereuses et à la congestion, réduit le nombre d'accidents.

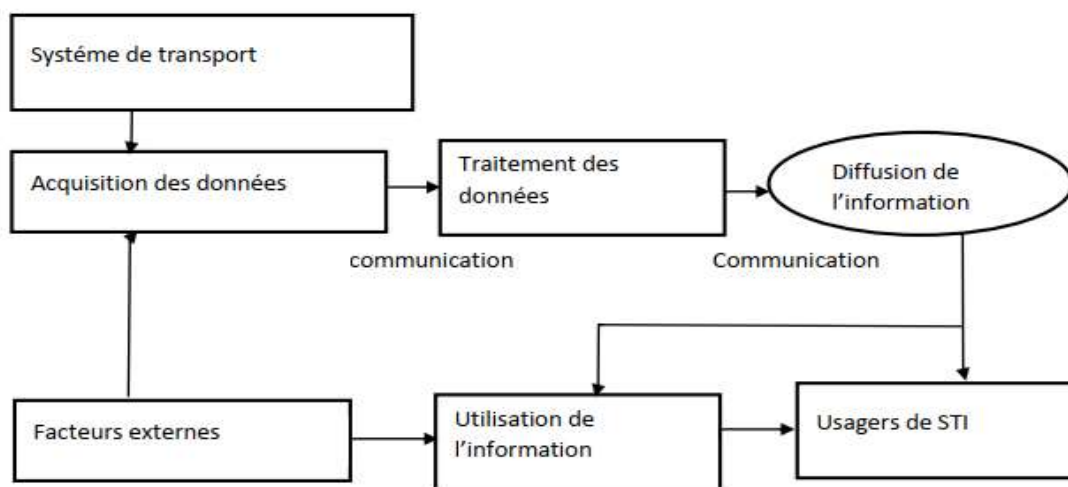
#### **III. 6.2. Fonctions des composantes de STI**

La figure [III.7] explique les fonctions de base STI on peut dégager entre autre : obtention d'information et traitement de données : L'information sur la circulation peut être obtenue de plusieurs façons et à partir de nombreuses sources simultanément. Il faut donc, traiter

les données, vérifier l'exactitude, corriger les renseignements contradictoires, organiser ces données dans des formats compatibles, et les combiner aux données provenant d'autres organismes. L'Utilisation de l'information, au niveau infrastructurel ça représente la détection des incidents, la gestion de la demande et la surveillance de la congestion, mais au niveau des véhicules c'est des systèmes évolués d'aide au conducteurs.

La communication : regroupe les solutions de télécommunications qui permettent de collecter l'information, de la transmettre et de la diffuser à distance.

La diffusion de l'information : Les ressources d'information peuvent être des panneaux à messages.



**Figure III.7 -Architecture de Chaîne d'information d'un STI**

### III.7. Modélisation du trafic routière

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

#### III.7.1. 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.

### **III.7.2. Outils Théoriques**

Dans ce point nous allons modéliser un système de transports en utilisant différents techniques efficaces de mise en place. Il est difficile d'opérer des feux de signalisation de façon optimale. Toutefois, la solution proposée précédemment vise à utiliser la communication route à infrastructure afin de récolter des informations en temps réel sur le trafic routier et contrôler ainsi les feux de signalisation. De nos jours, le problème de l'affectation dynamique prend une importance considérable. Enfin, nous pouvons dégager entre autres des outils nécessaires, mais il y a de nombreux outils que nous citons les plus fréquemment utilisés, à savoir : le contrôle par la logique floue, Algorithmes de contrôle des feux de circulation, les réseaux de neurones, files d'attentes.

La logique floue permet de mettre en place des degrés dans la vérification d'une condition et ne plus se borner à un choix strictement binaire. Ce principe est utilisé par quelques auteurs [44]. 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.

Les réseaux de neurones sont inspirés du fonctionnement des neurones biologiques et mettent en œuvre l'apprentissage par l'expérience. Dans le cas du trafic routier, plusieurs auteurs se sont penchés sur cet outil afin de gérer les feux de signalisation. Dans ce cas, il est question d'effectuer des classifications et d'apprendre à les améliorer. La logique floue et les algorithmes de contrôle des feux de circulation peuvent être vus comme des compléments aux réseaux de neurones [40,42].

Un algorithme de gestion des feux de circulation fonctionnant sur une intersection isolée. Cet algorithme sélectionne dynamiquement les mouvements et les temps de feu vert afin de réduire le temps moyen d'attente des automobilistes sans engendrer de famine. Dans notre cas, nous utiliserons un autre outil très répandu. Il s'agit des files d'attente et

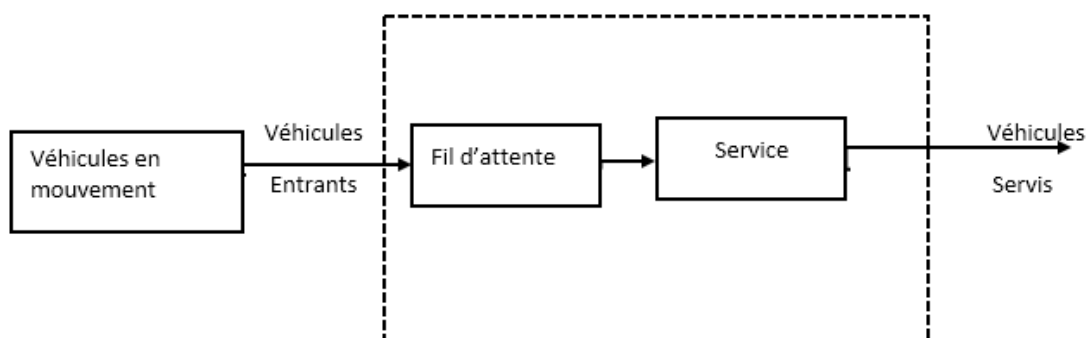
algorithmes de contrôle des feux de circulation. Nous les rencontrons dans divers domaines d'activité comme guichet de poste, trafic routier, central téléphonique, etc.

### III.7.3. Théorie de file d'attente et Application

La théorie des files d'attente est particulièrement adaptée au cas de la gestion du trafic routier. Cette dernière appartient au domaine des probabilités et permet donc une gestion optimale des files d'attente. Dans le cas d'un seul ou multiples intersections, une file d'attente est automatiquement créée lorsque les véhicules souhaitent obtenir un feu vert. Avec cette théorie, il est plus facile de calculer des valeurs telles que le nombre moyen de véhicules en attente, en service, le temps moyen d'attente ou encore de séjour dans le système [44].

La structure de base d'un système de file d'attente (FA) est qu'en général un système d'attente peut être résumé comme suit : des "clients" arrivent à un certain endroit et réclament un certain service. Les instants d'arrivée et les durées de service sont généralement des quantités aléatoires. Si un poste de service est libre, le client qui arrive se dirige immédiatement vers ce poste où il est servi, sinon il prend sa place dans la file d'attente dans laquelle les clients se rangent suivant leur ordre d'arrivée.

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.



**Figure III.8- Représentation de la structure de base d'une FA**

## Description de la structure de base d'une FA

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

- **La notation de Kendall**

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

D'où :

A : représente la loi de probabilité du processus d'arrivé ;

B: représente le processus de service;

C: représente le nombre de serveurs;

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

N : représente la taille de la population des clients;

D : représente quant à elle la discipline de service.

- **La loi de Little**

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

$$L = W * \lambda \quad (3.1)$$

L : est le nombre moyen de clients;

W: est le temps moyen passé dans le système ;

$\lambda$ : est le débit moyen d'un système stable.

Rappelons qu'un système est dit stable si et seulement si la fraction du taux d'arrivée par le taux de service est inférieur à 1, c'est-à-dire :  $\lambda = \mu < 1$ .

- **Files d'attente markoviennes**

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

### III.7.4. Système M/M/1

Une file d'attente M/M/1 est un système formé d'une file de capacité infinie et d'un unique serveur. Les clients arrivent dans le système selon un processus de Poisson de taux  $\lambda$ , sachant que  $\lambda$  est le temps d'inter-arrivée, et  $A(t)$  est une variable aléatoire de distribution exponentielle de paramètre  $\lambda$ . Le temps de service est distribué selon une loi exponentielle de paramètres  $\mu$ , sachant que  $\mu$  est la taille moyenne d'un paquet.

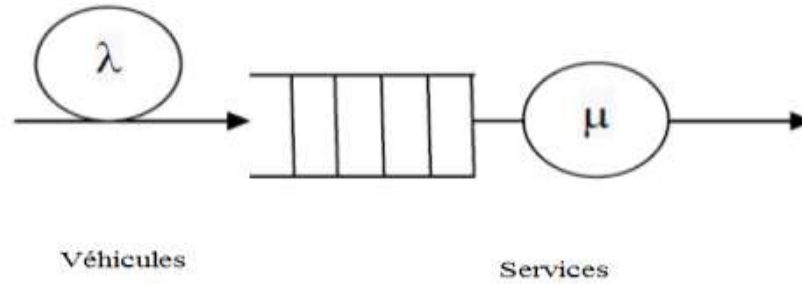
$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (3.2)$$

Avec  $P_k(t)$ : probabilité d'avoir k clients qui soient arrivés pendant t.

$$A(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.3)$$

Avec  $A(t)$ : probabilité d'une arrivée pendant t. L'ordre de service est FIFO [40]

D'une file d'attente M/M/1 se représente selon la figure III. 9 suivantes :



**Figure III.9-Schéma file d'attente**

Nous définissons ci-dessous quelques paramètres de performance : Taux d'utilisation du serveur  $U$  Par définition, le taux d'utilisation est la probabilité pour que le serveur de la file soit occupé.

$$\rho = \lambda / \mu \text{ Nombre moyen de clients } L$$

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

(3.4)

Temps moyen de séjour  $W$

Ce paramètre est obtenu en utilisant la loi de Little :

$$W = L / \lambda = 1 / (\mu * (1 - \rho)) \quad (3.5)$$

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

$$Wq = \rho / \mu * (1 - \rho) \quad (3.6)$$

### III.7.5. Temps d'attente total de tous les véhicules

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.

L'équation mathématique nous donne les résultats suivants :

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

Alors :

$$E[W] = E[d] * E[A(k)] \quad (3.7)$$

Le temps moyen d'attente durant un cycle.

$$E(WR) = E[\int_0^R (N(0) + A(t)) dt] = RE[N(0)] + \frac{\lambda R^2}{2} \quad (3.8)$$

$$E(WV) = E[\int_0^C N(t) dt] = \frac{\lambda p R}{2(1-\lambda p)^2} + \frac{p(2\lambda RE[N(0)] + (\lambda R)^2 + \lambda R)}{2(1-\lambda p)} \quad (3.9)$$

$$E(WC) = E(WR) + E(WV) = \frac{\lambda R}{2(1-\lambda p)} \left( R + \frac{2E[N(0)]}{\lambda} + p \left( 1 + \frac{1}{1-\lambda p} \right) \right) \quad (3.10)$$

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

$$E[d] = \frac{\lambda R}{2(1-\rho)} \left( R + \frac{2E[N(0)]}{\lambda} + p(1 + 1 - \rho) \right) \quad (3.11)$$

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  $A(t) \rightarrow P(\lambda)$ .

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

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

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

$WV$  : 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.

Dans ce cas, on suppose que la période verte (V) se compose de "m" départ chacun de longueur "p".

### Remarque

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

$$\text{Avec, } m = \frac{v}{p} \text{ et } q = \frac{R}{p} \quad (3.12)$$

### III.8. Réseaux de file d'attente

Pour arriver à modéliser des systèmes beaucoup plus complexes, une file d'attente simple n'est pas suffisante, il faut faire appel à des réseaux de files d'attente. Un réseau de files d'attente est composé de plusieurs files d'attente reliées entre elles, entre lesquelles circulent des flots de clients. Les clients une fois leur service terminé dans un point de contrôle, se déplacent vers une autre station ou quittent le système selon des règles de routage. Le réseau de files d'attente est caractérisé par [40] le chemin suivi par les clients dans le système et les classes de clients, note que le réseau peut être ouvert, fermé, ou mixte.

### III.8.1. Réseaux ouverts

Dans un réseau de file d'attente ouvert, comme le montre la figure suivante, les clients arrivent de l'extérieur, circulent dans le réseau à travers les différentes stations, puis quittent le réseau. Le nombre de clients pouvant se trouver à un instant donné dans un réseau ouvert n'est donc pas limité. Afin de spécifier complètement un réseau ouvert, il faut bien sûr caractériser chaque station, mais également le processus d'arrivée des clients et le routage (cheminement) des clients dans le réseau [28].

On dit qu'un réseau est ouvert si tout client présent ou entrant dans le système peut le quitter.

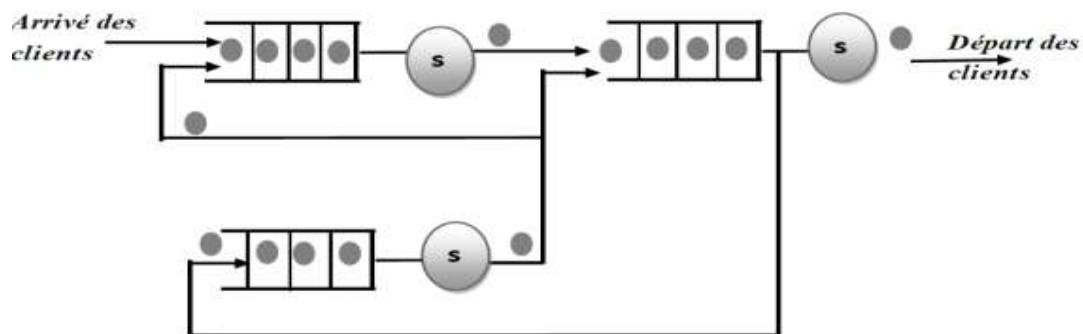
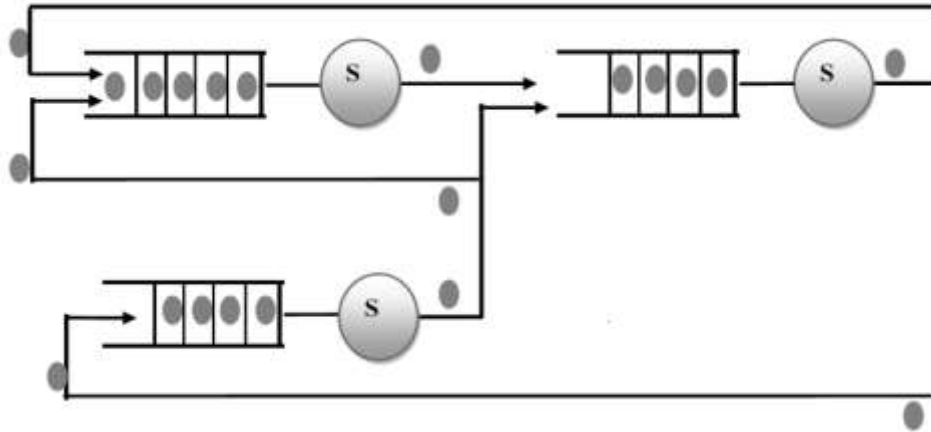


Figure III.10-Réseau de files d'attente ouvert à deux files

### III.8.2 Réseaux fermés

Dans un réseau de files d'attente fermées, comme la figure en dessous montre, les clients sont en nombre constant. Il n'y a donc pas d'arrivée ni de départ de clients. La spécification d'un réseau fermé se réduit donc à celle des différentes stations et à celle du routage des clients [28]. On dit qu'un réseau est fermé si les clients ne peuvent le quitter. Dans un tel réseau, le nombre de clients est généralement fixe et ces derniers sont présents dans le système dès le début de son évolution [28].



**Figure III.11-Réseau de files d'attente fermé à deux files**

### III.8.3. Réseaux multi-classes

Comme pour les files simples, les réseaux de files d'attente peuvent être parcourus par différentes classes de clients. Les différentes classes de clients se distinguent par des processus d'arrivée différents (si le réseau est ouvert), des comportements différents à chaque station (service et discipline de service) et des routages différents dans le réseau. La notion de réseaux multi-classes nous permet d'introduire la notion de réseau mixte qui est un réseau ouvert vis à vis de certaines classes et fermé vis à vis des autres classes.

En revanche réseau multi-classes ou mono est un réseau dont les files d'attente peuvent être parcourus par une ou différentes classes de clients [29].

### III.8.4. Réseaux mixtes

Un réseau est mixte s'il est ouvert pour certains clients et fermé pour d'autres

## III.9. Algorithmes de contrôle des feux de circulation

L'utilisation de la théorie des files d'attente est une approche venant en tête naturellement lorsqu'il s'agit de modéliser les files d'attente présentes aux intersections. Les auteurs de [36] abordent par exemple son utilisation, qui permet d'obtenir à partir des données recueillies par des capteurs et la camera, la taille moyenne d'une file sur une voie. Le temps de feu vert est calculé par rapport à la taille de ces files, de manière à obtenir le temps nécessaire à les traiter.

En se basant sur un déploiement de deux capteurs par voie l'un place à l'entrée l'autre à la sortie [44] définissent un mécanisme de gestion des feux de circulation d'une façon intelligente à une simple intersection en modélisant chaque mouvement comme une file d'attente M/M/1. En utilisant une matrice qui définit les mouvements en conflits, ils proposent un algorithme qui sélectionne les combinaisons de mouvements compatibles qui possèdent le plus grand nombre de véhicules sur leurs files. Puis Ils calculent ensuite le temps de feu vert proportionnellement au nombre total de véhicules détectés par la caméra. Leur algorithme élabore ainsi un plan de feu dynamique cycle après cycle avec un nombre de phases qu'ils fixent à quatre au maximum. Ils étendent ensuite leur travail à un réseau maillé d'intersections en sélectionnant tout d'abord, lorsqu'une phase débute, les mouvements qui reçoivent le plus de véhicules en provenance d'intersections proches. Leur méthode prend en compte le temps nécessaire pour aller d'une intersection à une autre, en incluant les arrêts et les ralentissements [29].

Les nœuds de destination (DN) surveillent et comptabilisent les départs lorsque Le feu est vert. Ces nœuds sont typiquement situés au niveau des feux de circulation, sur chaque voie d'entrée ou au début de chaque voie de sortie.

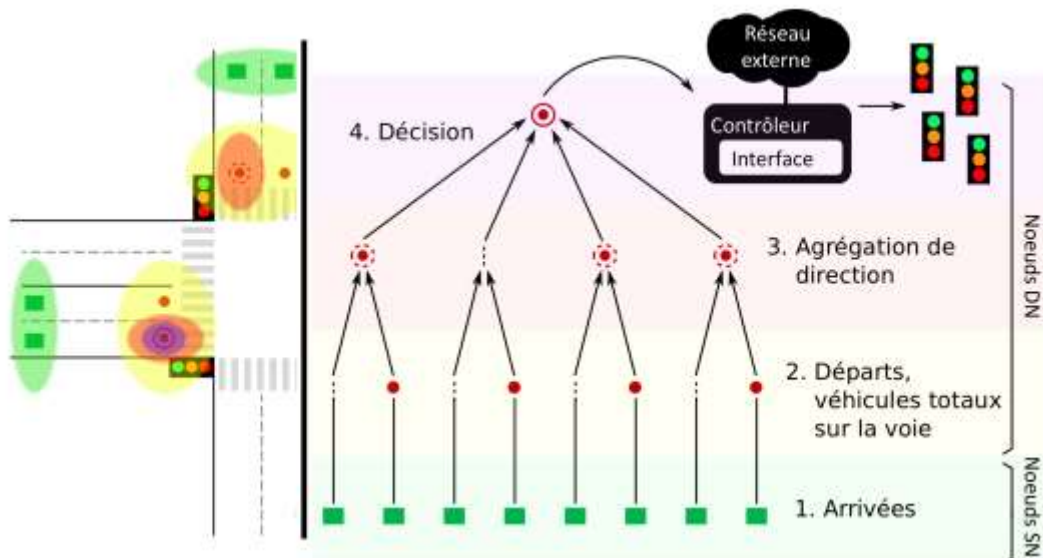
Les nœuds source (SN) mesurent les arrivées en permanence. Ils sont classiquement situés à une distance fixe de 50 mètres des feux de circulation, sur chaque voie. Il est important de bien régler cette distance. Si elle est trop petite, elle n'englobe pas suffisamment de véhicules. Pour de grandes files d'attente, ils peuvent également être remplacés par des caméras [31].

### **III.9.1. Algorithme Distribué et Adapté au Contrôle d' Intersection**

TAPIOCA (Distributed and AdaPtive Intersections Control Algorithm) Est un algorithme utilisé dans un réseau distribué (p. ex., un réseau de capteurs sans fil) afin d'obtenir les données de répartition des véhicules, de calculer et appliquer une politique de gestion des feux de circulation. TAPIOCA, c'est un algorithme utilisé par beaucoup d'auteurs [50] afin de gérer le trafic routier, il est considéré comme outil adaptatif dans le domaine routière, c'est pour cette raison que nous proposons dans notre travail peut être exécuté sur tous les cas des intersections différentes.

### III.9.2. Architecture

Parmi les nœuds *DN*, nous choisissons d'élire un *agrégateur de direction* pour chaque direction afin de collecter les données, traiter et agréger le trafic de tous les nœuds *DN* situés sur les voies émanant de la même direction. Ces agrégateurs servent également à la communication avec les intersections voisines, accessibles via leur route. Ces agrégateurs sera communiqué avec un nœud responsable calcul du plan de feux et de la communication avec d'autres capteurs pour faciliter l'orientation des véhicules en cas de débordement d'embouteillage des uns, Ce nœud décisionnel peut être élu les données fournis par les capteurs et la camera est réélu périodiquement pour remplir certains objectifs de prendre la décision [29].



**Figure III. 12- Architecture de TAPIOCA**

Les agrégateurs de direction possèdent des informations sur le nombre total de véhicules sortant de l'intersection vers une destination donnée. Ils sont en mesure d'envoyer cette information à toutes les intersections proches et afin d'agir en tant que passerelles vers ces intersections, dans le cas où le réseau fonctionne en multi-sauts. Les rôles d'agrégateurs sont échangeables. Cela signifie que le protocole d'élection distribué peut être chargé de sélectionner les meilleurs véhicules en fonction de plusieurs critères.

### III. 9. 3. Distance entre les nœuds Source et Destination

En se référant dans les différents ouvrages écrits par des nombreux auteurs, qui estiment que la distance séparant les nœuds SN et DN doit être fonction des limites temporelles fixées sur l'intersection [28,50].

Nous estimons ainsi qu'elle doit correspondre au nombre de véhicules qui peuvent traverser l'intersection lorsque la durée du feu vert est à son maximum autorisé, noté  $T^{gmax}$ . Cette durée est généralement bornée pour limiter le temps d'attente qui serait mal perçu par les usagers. Cette distance peut être réglée à :  $D = n * l_{veh}$ ,

Où on note que :

$n$  : nombre de véhicules qui sont capables de passer en  $T^{gmax}$  secondes,

$l_{veh}$  : taille moyenne d'un véhicule;

$\tau^s$  : temps de démarrage d'un véhicule ;

$\tau^h$  : représente le temps inter-véhiculaire.

$$\text{Alors : } n = \frac{T^{gmax} - \tau^s}{\tau^h} \quad (3.13)$$

#### Durée de phase

La vie d'une intersection est, dans notre algorithme propose, une succession de phases. Les phases se succèdent et l'algorithme veille à ce que tous les mouvements soient sélectionnés régulièrement.

#### Duree de temps de feu vert

Rappelons que,  $T^s$  est le temps de démarrage et  $\tau^h$  est le temps qui sépare le passage de un ou plusieurs véhicules successifs.  $\tau^{gmax}$  est la durée de feu vert maximale, qui est soit définie par l'utilisateur, soit déterminée de façon à équilibrer les performances et l'expérience des utilisateurs.  $\tau^g$ , le temps de feu vert, est calculé en fonction de la charge de la voie ayant le plus grand nombre de véhicules.

$$\tau^g = \min (\tau^s + \eta^{max} \cdot \tau^h) \quad (3.14)$$

Où  $\eta^{max}$ : est le nombre de véhicules sur la voie la plus chargée.

Dans le cas où  $\tau^g < \tau^{gmax}$ , les véhicules additionnels peuvent arriver sur ces voies. Dans ce cas, nous choisissons de laisser le temps de feu vert se prolonger d'une période de  $\tau^h$ , jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de nouvelles arrivées, ou jusqu'à ce que  $\tau^g = \tau^{gmax}$ .

Algorithme TAPIOCA pour une intersection isolée, le plus souvent, on dit qu'une intersection est isolée, quand chaque intersection est seule. Dans ce cas, il n'y a pas besoin de communication à large échelle, le but étant juste de considérer un flux de véhicules entrant. Les capteurs et les cameras déployés sur chaque voies composent intersection échangent des informations en utilisant le système de communication de RCSF et se mettent en accord sur un plan de feux.

Au lieu de définir des cycles, l'algorithme fonctionne uniquement avec une granularité d'une phase. De plus, la sélection dynamique des mouvements s'effectue sur la base de deux objectifs: réduire le temps d'attente moyen et éviter les situations de famine. Enfin, cet algorithme permet également de donner le feu vert aux mouvements qui sont légèrement en conflit. Ces mouvements sont des mouvements qui n'ont pas d'impact sur la sécurité des utilisateurs, c.-à-d. lorsque des règles de priorités évidentes existent entre les mouvements. Ces trois propriétés permettent à cet algorithme de réduire le temps moyen d'attente des usagers.

- la base de deux objectifs;

Si on considère qu'un mouvement possible  $(s; d)$  allant de la direction  $s$  à la direction  $d \in D$ , noté  $D$  l'ensemble des directions possibles. Le nœud de décision connaît la répartition des véhicules sur l'intersection. Il est donc capable d'associer un score local  $S(s; d)$  au mouvement  $(s; d)$ . Ce score dépend du nombre de véhicules présents sur les voies entrantes qui composent le mouvement  $(n^{(s,d)})$  et du temps passé depuis la dernière sélection du mouvement  $(F^{(s,d)})$ , c.-à-d. depuis qu'il a eu le feu vert. Dans ce cas, si on combine les métriques qui reflètent chaque objectif dans une seule expression afin de définir formellement ce score. À ces fins, nous formalisons chaque objectif en utilisant une fonction générique,  $\gamma ()$ .

Le but de cette fonction est de mettre les objectifs  $F$  et  $\eta$  dans l'intervalle  $[0; 1]$  et ainsi de les pourvoir de dimensions, à des fins de comparaison  $\gamma (\{f, n\}^{(s,d)})$  est défini

naturellement comme la relation entre la valeur de l'objectif du mouvement ( $s; d$ ) et la somme de toutes les valeurs d'objectif des différents mouvements nous obtenons la formuler comme suit :

$$\gamma (F^{(s,d)}) = \frac{F^{(s,d)}}{\Sigma F} \quad \gamma ((n^{(s,d)}) = \frac{n^{(s,d)}}{\Sigma n} \quad (3.15)$$

Si la somme toutes les valeurs de  $\{F; \eta\}$  est nulle, alors ce score est nul également. Lorsque cette étape est réalisée, une approche classique serait de définir le score comme étant une combinaison linéaire de  $\gamma (F^{(s,d)})$  et de  $\gamma ((n^{(s,d)})$ .

Dans notre travail nous allons améliorer l'algorithme utilisé [31] pour nous permettre d'atteindre nos objectifs.

- Sélection d'une phase

Une fois que les nombres des véhicules ont été calculés pour chaque mouvement, le nœud de décision DN examine quels mouvements peuvent être combinés afin de créer une nouvelle phase d'orientation.

- Politique avec des mouvements faiblement en conflit.

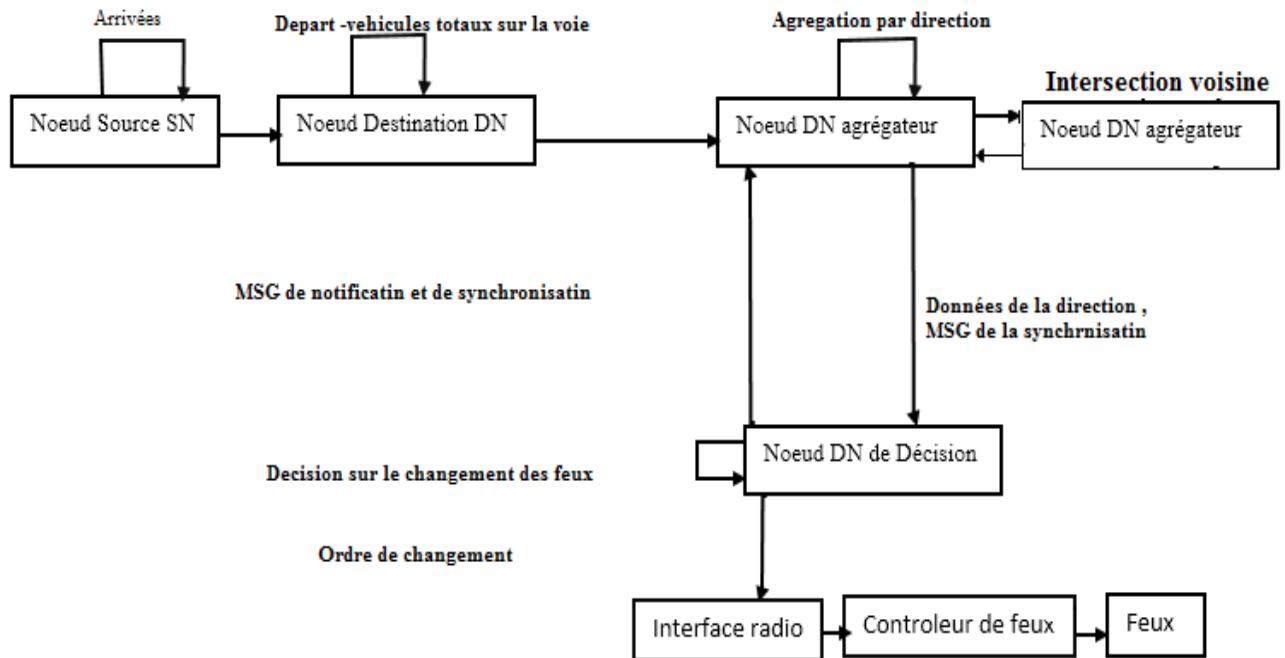
Les véhicules qui tournent à gauche ont généralement la priorité la plus basse, ils sont bloqués lorsqu'un véhicule vient du mouvement situé dans la direction opposée.

L'algorithme de Contrôle de feux de circulation est décomposé en 7 étapes : [28] comptabilisation des véhicules sur chaque voie (nœuds SN et DN), agrégation par direction (nœuds agrégateurs de direction), composition de la prochaine phase (nœud décision), durée de la prochaine phase (nœud décision), transmission aux intersections voisines (nœud décision, agrégateurs), application de la phase (nœud décision) et pendant la phase  $P + 1$  (nœud décision).

La surveillance des véhicules entre les intersections et de nœud DN : durant la phase  $P + 1$ , les nœuds DN des directions sélectionnées peuvent envoyer les signatures temporisées des véhicules aux nœuds DN correspondant sur les intersections qui sont susceptibles de les accueillir.

Cela permet d'estimer le temps qui est requis pour aller d'une intersection à une autre. Ce délai peut être utilisé afin d'améliorer le processus de création de vagues vertes, sa variation permettant de détecter assez tôt une formation d'embouteillage.

La figure III.13 représente le diagramme d'activités en collaboration avec TAPIOCA, c à d les relations qui existent entre les nœuds et les principales actions de l'algorithme.



**Figure III.13-Diagramme d'activités en collaboration avec TAPIOCA**

L'algorithme de contrôle de feu est une méthode algorithmique (théorique) permettant de déborder le trafic en cas de congestion est laisse passer certains véhicules après l'analyse du chemin non sature ou de borde, cet algorithme décrit la procédure qui permet à un nœud *DN* de savoir si le feu auquel il est rattaché est vert ou non, et d'envoyer en conséquence des demandes de changement de feux au contrôleur. Les nœuds *DN* demandent le passage de feu au vert en temps réel lorsque des véhicules sont en attente sur sa voie ou ses mouvements, et que la route de destination n'est pas pleine « cfr lignes 4 à 10 du figure III.14 de nos algorithme ». Ils demandent le feu rouge vice versa, leur demande est assortie de leur évaluation du nombre de véhicules qui pourront traverser le carrefour.

L'adaptation au trafic se fait de façon dynamique, et ne passe pas par l'estimation d'un temps de feu vert sur un ensemble prédéterminé de phases. Il s'agit également d'un bon moyen pour détecter les embouteillages via la caméra. En effet, si aucun véhicule n'est en mouvement sur un nœud *DN*, alors soit le feu est rouge, soit les véhicules sont bloqués.

**Paramètres** : *mouvements*, liste des mouvements de l'intersection.

**Variables** :  $\eta_{a,b}$ , nombre de véhicules représentatifs du mouvement ( $a, b$ );

$\epsilon^a$ , espace libre sur la route  $a$ ;

*Booléen Vert*, booléen identifiant si le feu est vert (1) ou non (0).

```

1 booléenVert ← 0 // Initialisation de la variable globale
2 Procédure DecisionDN() :
   /* Aucun véhicule n'a été détecté depuis le dernier appel de la procédure.
   Trois possibilités : le feu est rouge, des véhicules sont arrêtés, ou
   aucun véhicule n'est présent. */
3 si derniersVehicules() == 0 alors
   /* Cas 1 : le feu est rouge. Les métriques sont mises à jour et si
   possible, une demande pour passer le feu au vert est envoyée. */
4   si booléenVert == 0 alors
5     pour chaque ( $a, b$ ) ∈ mouvements faire
6       interpolation( $a, b$ );
7       si  $\epsilon^b > 0$  et  $\eta^{(a,b)} > 0$  alors
8         | demandeVert( $a, b$ );
9       finsi
10    finprch
11   /* Cas 2 : le feu est vert. Deux possibilités : (1) les véhicules sont
   stoppés par un embouteillage, ou (2) il n'y a plus de véhicules.
   Dans tous les cas, le passage du feu au rouge est demandé. */
12   sinon si booléenVert == 1 alors
13     | demandeRouge( $a, b$ );
14   finsi
15   booléenVert ← 0;
16 /* Au moins un véhicule a été détecté depuis le dernier appel de la
   procédure. Le feu est donc encore considéré comme vert. Aucune action
   n'est à effectuer. */
17 sinon
18   | booléenVert ← 1;
19 finsi
20 finproc

```

Figure III.14-Algorithmme simplifié de contrôle de feu

### Description d'un algorithme:

- Interpolation (a, b) : met à jour les métriques du mouvement (a, b);
- Derniers Véhicules () : retourne le nombre de véhicules qui sont passés depuis le dernier appel de la procédure;
- Demande Vert (a, b) : le nœud *DN* envoie un requête de demande de passage au feu vert au contrôleur;
- Demande rouge (a, b) : le nœud *DN* envoie une requête de passage au feu rouge au contrôleur.

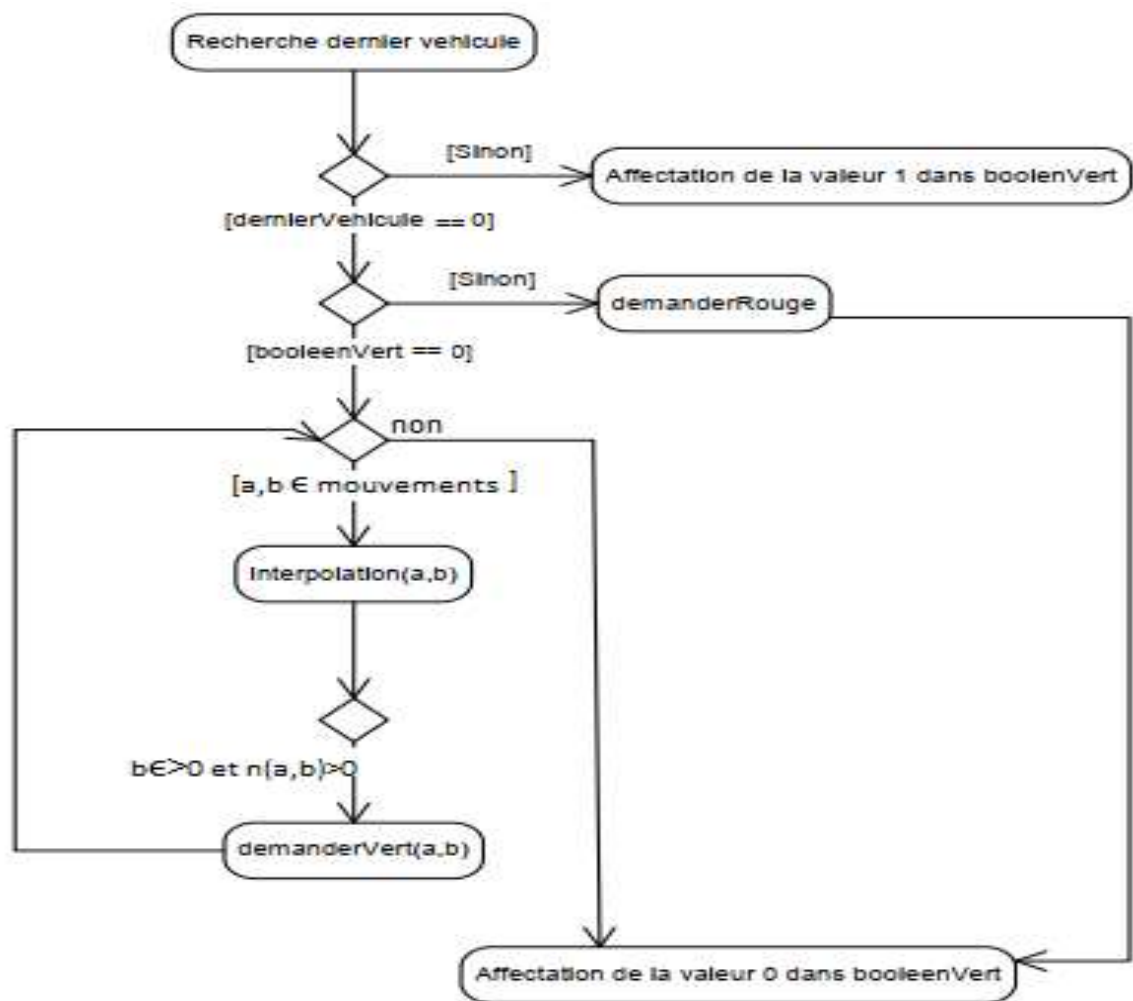


Figure III.15-Algorithmme TAPIOCA détaillé

### **III.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons proposé et évalué un algorithme adaptatif de contrôle des feux de circulation distribué sur une ou plusieurs intersections et qui utilise un réseau de capteurs sans fil. Sur la base des équipements de système d'intelligence routière, nous avons montré la modélisation mathématique où nous avons fait le choix selon le contexte d'étude du terrain comme modèle de file d'attente, qui permet de collaborer avec ledit algorithme afin de calculer un meilleur temps d'attente des véhicules et le temps de feux vert ou rouge, temps de trajet et longueur de file d'attente par rapport à une solution prédéterminée, mais également par rapport à des solutions adaptatives. Outre les performances brutes de l'algorithme, ces résultats montrent qu'il existe un intérêt dans la gestion du trafic à l'échelle de l'intersection et de son voisinage direct. Dans le chapitre suivant, nous nous intéressons à la simulation où dans notre travail nous avons fait le choix de simulateur SUMO.

## CHAPITRE IV : SIMULATION DU TRAFIC

### IV.1. Introduction de la simulation

La simulation possède plusieurs avantages dans la gestion du trafic routier. En effet, un simulateur est capable de modéliser des situations réalistes et parfois complexes, tout en nous donnant la possibilité d'agir en implantant certains éléments comme algorithmes de gestion de feux de circulation, contrôleur, fichier XML récupéré par OpenStreetMap, caméras etc.

### IV.2. Généralité sur la simulation

Dans cette section, nous présentons les résultats de simulation pour la commande de feux de circulation pour trois intersections l'une de RN 1(gale du nord) comme intersection principale et deux dernières celles de Nations Unis RN4 et de la BRARUDI RN 5 sera réservé pour orientation des véhicules en cas de débordement sur l'intersection de RN 1. Nous utilisons SUMO 0.32.0 pour simuler le comportement des véhicules.

En revanche, la simulation est une technique largement utilisée pour l'évaluation des performances. Elle traduit d'une manière plus réaliste le comportement du système à évaluer. La simulation est souvent sollicitée lorsque :

- L'expérience sur le système est impossible ou dangereuse ;
- Le système évolue rapidement de telle sorte qu'on ne peut pas l'observer avec précision ;
- Le système évolue très lentement ;
- L'expérience est coûteuse financièrement ;
- En cas de manque des matériels nécessaires ;
- En cas de manque des techniciens qualifiés dans les domaines ;
- Etc.

Les paramètres de simulation d'intérêts principaux sont le nombre moyen de véhicules dans la file d'attente " $N(0)$ ", et le temps d'attente moyen dans la file " $N(T)$ ". 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.

#### **IV.2.1. Pourquoi Simulateur SUMO**

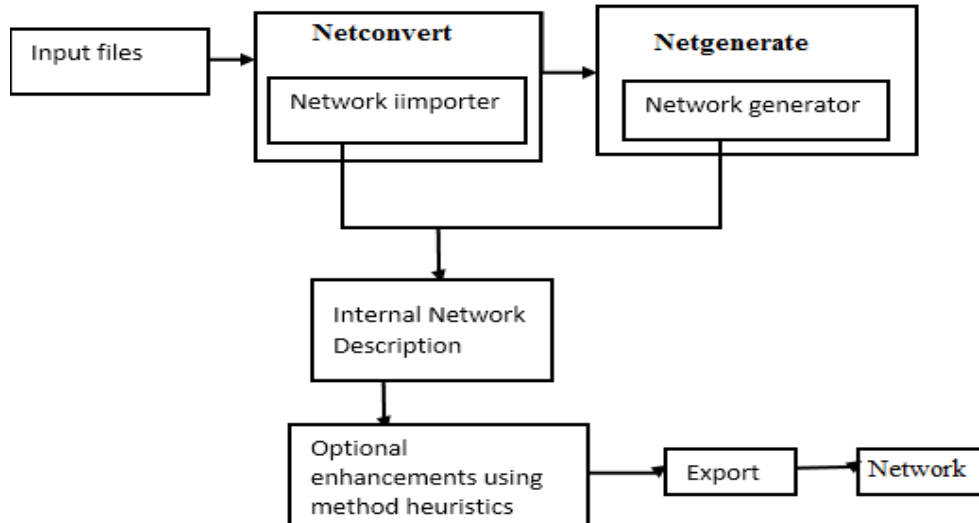
SUMO (Simulation of Urban Mobility) est un progiciel de simulations de trafic routier open source sous licence ONU public (OPL), dont le développement a commencé en 2002. L'objectif des développeurs est de mettre à la disposition du monde académique un outil leur permettant de modéliser le réseau routier aussi bien en milieu urbain qu'environnement autoroutier. Le progiciel SUMO contient une suite d'applications et algorithmes qui aident à préparer et à exécuter la simulation d'un scénario de trafic routier. Les différentes applications incluses dans la suite SUMO seront présentées dans cette sous-section en fonction de leur véhicule d'étude [2].

#### **IV.2.2. Génération du réseau routier**

Les réseaux routiers du monde réel sont reproduits dans SUMO comme un graphe où les sommets (nœuds) correspondent aux intersections tandis que les arêtes représentent les routes. Le réseau routier SUMO comprend des plans de feux de circulation et les connexions entre les voies à travers des intersections pas dans tous les pays. Les réseaux routiers peuvent être directement générés à l'aide de l'application «netgenerate» ou par importation des fichiers de carte routière de la OpenStreetMap [40] avec l'application «netconvert». En outre, netconvert permet de lire les fichiers XML représentant un graphe réseau routier. On distingue 5 types de fichiers XML qui décrivent les nœuds,

A savoir : les routes, les types de routes, les connexions entre les voies et le plan des feux de circulation.

Les applications netgenerate et netconvert partagent la même bibliothèque pour générer ou importer les réseaux routiers dans le simulateur SUMO. Elles utilisent les méthodes heuristiques (est une méthode de résolution utilisée pour fournir une solution réalisable lorsqu'un problème est trop complexe pour corriger les données manquantes dans les fichiers XML). On peut énumérer entre autres les étapes de génération d'un réseau routier résumées sur la figure IV.1.



**Figure IV.1-Architecture de Génération d'un réseau routier**

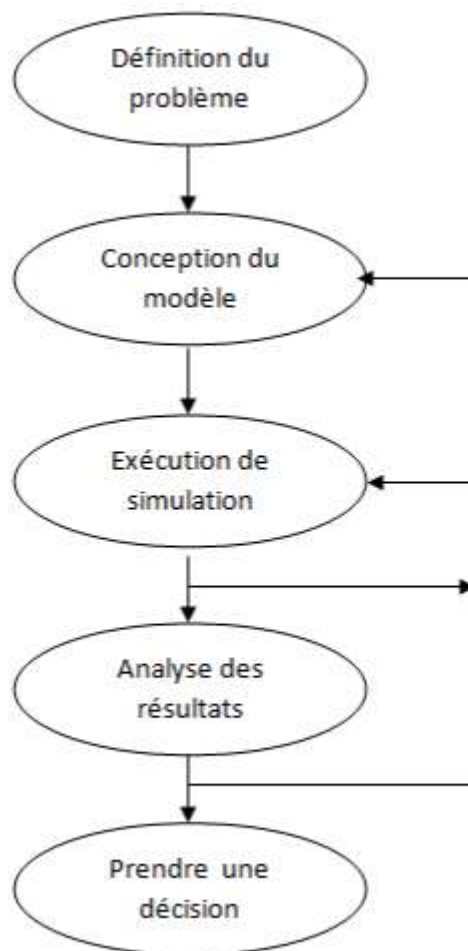
netconvert : netconvert importe des réseaux routiers numériques à partir de différentes sources et génère des réseaux routiers qui peuvent être utilisés par d'autres outils du package. Netconvert est une application en ligne de commande. Il suppose au moins un paramètre la combinaison du nom du type de fichier à importer en tant que nom de paramètre et du nom du fichier à importer en tant que valeur de paramètre. Donc, pour importer un réseau depuis OpenStreetMap, on pourrait simplement écrire: *netconvert --osm my\_osm\_net.xml* [10].

### IV.2.3. Cycle de simulation

Il y a cinq phases dans le cycle de simulation pour que notre système soit modélisé. Elles sont représentées par des différentes étapes à savoir :

- **Définition du problème** : cette étape consiste principalement à identifier et à analyser le problème, en déterminant ses composantes et les frontières entre le système et son environnement ;
- **Conception du modèle** : cette phase consiste à extraire un modèle aussi fidèle que possible du système temps réel dans le but d'expliquer et de prédire certains aspects de son comportement ;

- Exécution de la simulation : le concepteur doit pouvoir mettre à l'épreuve le modèle en agissant sur les paramètres qui le configurent. (Il s'agit d'effectuer plusieurs exécutions et de recueillir les résultats obtenus) ;
- Analyse des résultats : une fois les résultats obtenus, le concepteur passe à l'analyse et à l'interprétation de ces résultats afin de comparer à ces dernière;
- Prendre une décision : cette étape consiste à débloquent (ou prise de décision) les véhicules sur la file d'attente.



**Figure IV.2- Diagramme d'activité de Cycle de simulation**

### **IV.3. Types de simulation**

En fonction du type d'évènement dans la simulation, nous avons distingué deux types de système de simulation :

- Systèmes discrets ;
- Systèmes continus.

#### **IV.3.1. Systèmes de simulation discrets**

Ces Sont des systèmes pour lesquels, les variables concernées pour la simulation en changeant d'état qu'en un nombre fini de points sur l'axe du temps on appelle également ces systèmes : systèmes de simulation à événement discrets [17].

#### **IV.3.2. Systèmes de simulation continue**

Ce sont des systèmes pour lesquels les variables peuvent changer d'état à n'importe quel instant pendant la simulation [10].

#### **IV.3.3. Simulation par événement discrets**

La simulation par événement discrets désigne la modélisation d'un système réel tel qu'il évolue dans le temps, par une représentation dans laquelle les grandeurs caractérisent le système (variables) qui ne change qu'en un nombre fini ou dénombrable de points isolés dans le temps [21].

Ces points sont les instants où se passent les événements. Pour une station de file d'attente, les événements généralement considérés comme l'arrivée des véhicules à l'intersection, la prise en charge des véhicules par le serveur et la sortie des véhicules dans l'intersection vers la destination orientée.

### **IV.4. Outil de simulation**

Afin de pouvoir simuler le phénomène de la congestion urbaine, notamment, à l'intersection sans feux de signalisation, nous avons opté pour le logiciel SUMO 0.32.0. Dans le simulateur, l'unité de mesure du temps est la microseconde.

La position de chaque véhicule est décrite par sa localisation sur la voie en partant du début de son trajet. La vitesse de déplacement (m/s) d'un véhicule est évaluée en utilisant une extension du modèle stochastique. Deux versions de la simulation de trafic routier existent dans le simulateur SUMO:

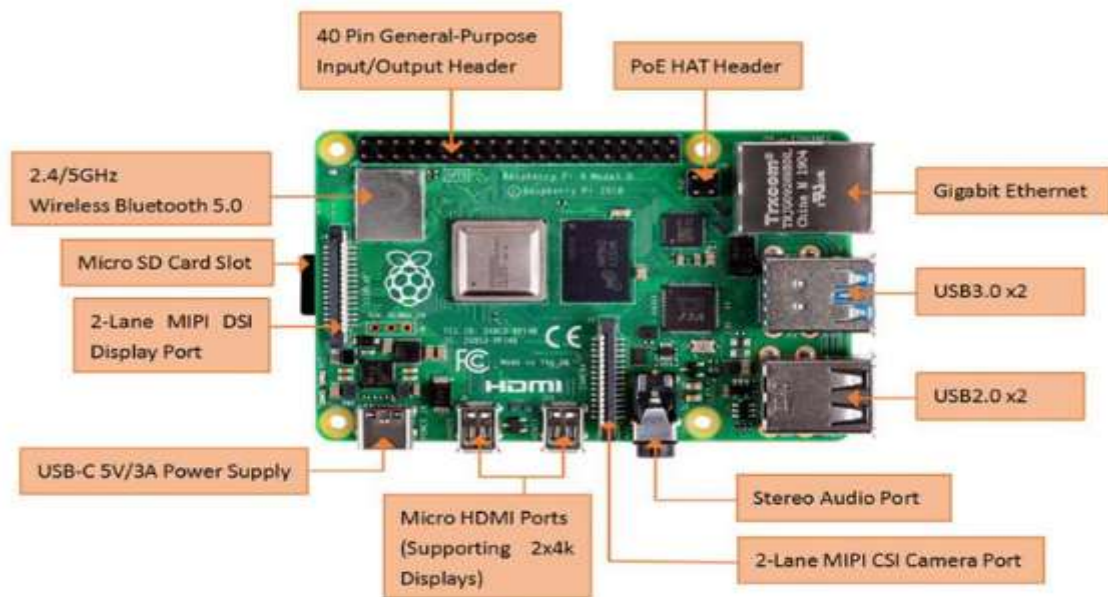
- Sumo: une application qui permet d'exécuter les simulations en ligne de commande;
- Sumo-gui : permet de simuler le trafic routier grâce à une interface graphique utilisant OpenGL. La visualisation peut être personnalisée de plusieurs manières: gérer la vitesse des véhicules, le temps d'attente, et l'interaction avec les programmes de signalisation routière.

Dans notre travail de mémoire, nous avons fait le choix de simulation de trafic pour raison que nous avons cités ci-haut dans la section [III, section 2 : Généralité de simulation]. Pour que notre simulation de gestion de trafic routière soit réalisée, nous avons besoin des différents outils matériels et logiciels qu'on va décrire dans le paragraphe suivant.

Il s'agit entre autre :Raspberry pi, Caméras pi, OpenCV, Langage python, Système d'exploitation UBUNTU, OpenStreetMap, Fichier XML Sans oublier le logiciel de simulateur SUMO qui va nous aider à simuler.

#### **IV. 4.1. Raspberry pi**

Raspberry pi est un nano ordinateur mono-carte qui contient un processeur ARM, elle comporte un processeur ARM, GPU, RAM, d'autres ports comme HDMI, RJ45 (pas dans tous les modèles) et même des pins où on accroche des autres composants comme une caméra, des détecteurs ...etc.



**Figure IV.3-Raspberry Pi 3 model B+**

### Fonctionnement

Le Raspberry pi ne dispose pas d'un disque dur interne (cela augmenterait grandement sa taille) et on stockera les données sur une carte SD. Par défaut, le Raspberry pi, est nu, comprendre par là qu'il est vendu sans accessoires. Pour pouvoir l'utiliser vous devrez donc avoir :

- Une carte micro SD compatible avec le modèle Raspberry pi ;
- Un câble d'alimentation micro USB standard ;
- Un câble RJ45 pour se connecter au réseau ;
- Un câble HDMI afin de connecter le Raspberry pi un écran ou une télévision ;
- Un clavier pour taper les commandes.

Une fois la carte micro SD préparée, il vous suffira de l'insérer dans votre Raspberry pi pour faire fonctionner automatiquement le système. (Nous pouvons accéder à cet écran plus tard en tapant la commande `sudo raspi-config`).

## Comment connecte avec d'autres modules

Pour connecter une carte Raspberry Pi on est besoin de:

- **Carte mémoire Micro SD:** On utilise la carte mémoire puisqu'elle va contenir le Système d'exploitation et les programmes que nous allons créer.
- **Chargeur :** la carte Raspberry Pi a besoin d'une alimentation de 5V/2A, avec un adaptateur micro USB.
- **Monitor (écran):** Pour afficher le desktop de la raspberry pi on utilise un moniteur qui contient un port HDMI ou VGA.
- **Câble HDMI:** Dans le cas où on veut utiliser la carte raspberry pi avec une télévision (LED) il faut utiliser le câble HDMI car la carte raspberry pi contient un port pour ce type de câbles.
- **Clavier et souris:** Pour la communication avec la carte Raspberry Pi nous utilisons un clavier et une souris ordinaire avec entrée USB.
- **Système d'opération :** La carte raspberry pi nécessite un system d'exploitation pour sa gestion qui permet d'accéder et gérer le côté matériel et les entrées sorties [7].
- L'utilisation de carte raspberry pi nécessite une connexion Internet peut être établie via un câble réseau sur un port Ethernet. Sur le port USB, il est possible de connecter divers périphériques, comme une souris, un clavier ou un disque dur externe, entre autres.

## Types de langages de programmation utilisés

Les langages de programmation sont nécessaires pour programmer la carte Raspberry pi, il faut avoir d'abord un système d'exploitation Raspbian qui est un système recommandé par Raspberry Pi, il se base sur celui de Debian. D'autres systèmes d'exploitation peuvent être utilisés, comme Linux ou Android, mais il est préférable d'opter pour Raspbian.

Les langages de programmation qui sont les meilleurs pour programmer la carte Raspberry pi il y en a beaucoup, mais le plus utilisable c'est le python, car **Python** est utilisé comme langage de programmation principal de Raspberry Pi par les développeurs.

## **Pourquoi utiliser python pour programmer raspberry pi ?**

On utilise le langage de programmation Python car c'est un langage puissant dans programmation de carte dynamique utilisé dans différents domaines.

Les principaux points forts de Python sont: les grandes possibilités du langage. Il va aussi bien être adapté aux petits projets qu'aux gros projets, peut-être cross plateforme, stable, langage qui est assez vieux et qui a fait ses preuves et Simple à comprendre.

### **IV.4.2. Cameras pi**

La camera pi est une petite caméra relié sur la nappe de la carte Raspberry, mais le principe de fonctionnement de basse et au cas où la nappe est connecté sur la carte il permet de capter automatiquement les images et le vidéo et enregistre automatiquement dans la carte raspberry incorporé par la carte SD. Il déconseillé qu'avant d'installer caméra pi, de débrancher Raspberry Pi.

Avant toute installation sur le système, il est bon de mettre à jour la distribution avec la dernière version en tapant dans un terminal : `$sudo apt-get update` et `$sudo apt-get upgrade`.

Il ne nous reste plus qu'à accéder aux paramètres de configuration du RPi en exécutant la commande suivante : `sudo raspi-config`

L'utilisation est simple, la caméra est accessible grâce à deux logiciels en ligne de commande qui permettent de prendre des photos (*raspistill*) et des vidéos (*raspivid*).

### **IV.4.3. OpenCV**

OpenCV (Open Source Computer Vision) est une bibliothèque d'algorithmes permettant d'extraire des informations à partir d'images. Avec OpenCV, il est possible d'exécuter des tâches très précises de détection ou d'identification d'image. Par exemple trouver des ressemblances de motifs ou bien de déterminer des contours d'véhicules.

Le but principal est de permettre à une machine d'analyser, traiter et comprendre des images prises par un système (une caméra PTZ par exemple) .La fonctionnalité principale de la bibliothèque OpenCV met à disposition de nombreuses fonctionnalités très

diversifiées permettant de créer des programmes en partant des données brutes pour aller jusqu'à la création d'interfaces graphiques basiques.

Dans le système d'exploitation Linux, il est peu difficile d'installer la bibliothèque OpenCV mais c'est simple il suffit de taper les commande suivant :

```
$sudo apt-get update;
```

```
$sudo apt-get upgrade;
```

```
$sudo apt-get dist-upgrade;
```

```
$sudo apt -get-install OpenCv2.
```

L'OpenCv fonctionne avec tous les systèmes d'exploitation de Linux à Windows ainsi qu'Android. De plus, son API est disponible pour la majorité des langages de programmations JAVA, et Python.

Afin de mieux vous présenter son étendue et ce qu'elle permet de faire, jetons un œil aux principaux modules accessibles:

- **core**: les fonctionnalités de base. Cette bibliothèque permet de manipuler les structures de base, réaliser des opérations sur des matrices, dessiner sur des images, sauvegarder et charger des données dans des fichiers XML;
- **imgproc**: traitement d'image. Les fonctions et structures de ce module ont trait aux transformations d'images, au filtrage, à la détection de contours, de points d'intérêt ;
- **features 2d** : descripteurs. Ce module concerne principalement l'extraction de descripteurs selon deux approches courantes (SURF et Star Detector);
- **objdetect**: détection d'véhicules. Cette bibliothèque permet de faire de la reconnaissance d'véhicule dans une image au moyen de l'algorithme Adaboost (Viola & Jones,) ;
- **Highgui**: entrées-sorties et interface utilisateur. OpenCV intègre sa propre bibliothèque haut-niveau pour ouvrir, enregistrer et afficher des images et des flux vidéo;
- **calib 3d** : calibration, estimation de pose et stéréovision. Ce module contient des fonctions permettant de reconstruire une scène en 3D à partir d'images acquises avec plusieurs caméras simultanément.

## Détection de véhicules avec OpenCV

La détection des véhicules est un domaine très actif de la recherche qui cherche à classer et localiser des régions/zones d'une image. Ce domaine est à la croisée de deux autres : la classification d'image et la localisation dvéhicules. [cfr dans la section 4.2;4.3 du chapitre 2) [11]. Avant toute chose, faisons la liste de nos outils et bibliothèques à installer pour faire détecter de véhicule via OpenCv. Il s'agit: Linux Ubuntu 18.04, Python3, Open CV, OpenCV-python et Fichier haarCascade détection de véhicule.

- **Cascade de haar pour la détection des véhicules**

Une cascade de haar est fondamentalement un classificateur utilisé pour détecter des véhicules. La méthode de Haar : détection de véhicule, les chercheurs Paul Viola et Michael Jones en 2001 ont proposés une méthode de détection de véhicule dans une image numérique. Elle fait partie des toutes premières méthodes capables de détecter des véhicules en temps réel dans une image et elle peut également être utilisée pour détecter d'autres types de véhicules. La méthode de Viola et Jones est l'une des méthodes les plus connues et les plus utilisées, en particulier pour la détection. Une étape préliminaire très importante est l'apprentissage du classificateur. Il s'agit d'entraîner le classificateur afin de le sensibiliser à ce que l'on veut détecter. Pour cela, il est mis dans deux situations. La première où une énorme quantité des images positives (avec le véhicule à détecter) lui sont présentés et la deuxième où, à l'inverse, une énorme quantité des images négatives lui sont présentés. Lorsque nous souhaitons créer un classificateur Haarcascade, nous avons besoin d'images "positives" et d'images "négatives". Les images "positives" sont des images contenant principalement des véhicules. Cela peut être soit des images contenant principalement des véhicules détectés, soit des images contenant des véhicules seul, et nous devons spécifier la région d'intérêt où se trouvent des véhicules détectés. Les images "négatives" peuvent être n'importe quoi et sont des images d'arrière-plan qui ne contiennent pas les véhicules que nous recherchons détecter [9].

Dans notre travail, la détection s'applique sur une image de test, dans laquelle on souhaite déceler la présence et la localisation d'un véhicule. En voici les étapes : parcours de l'ensemble de l'image à toutes les positions, avec une fenêtre de taille pixels et variable,

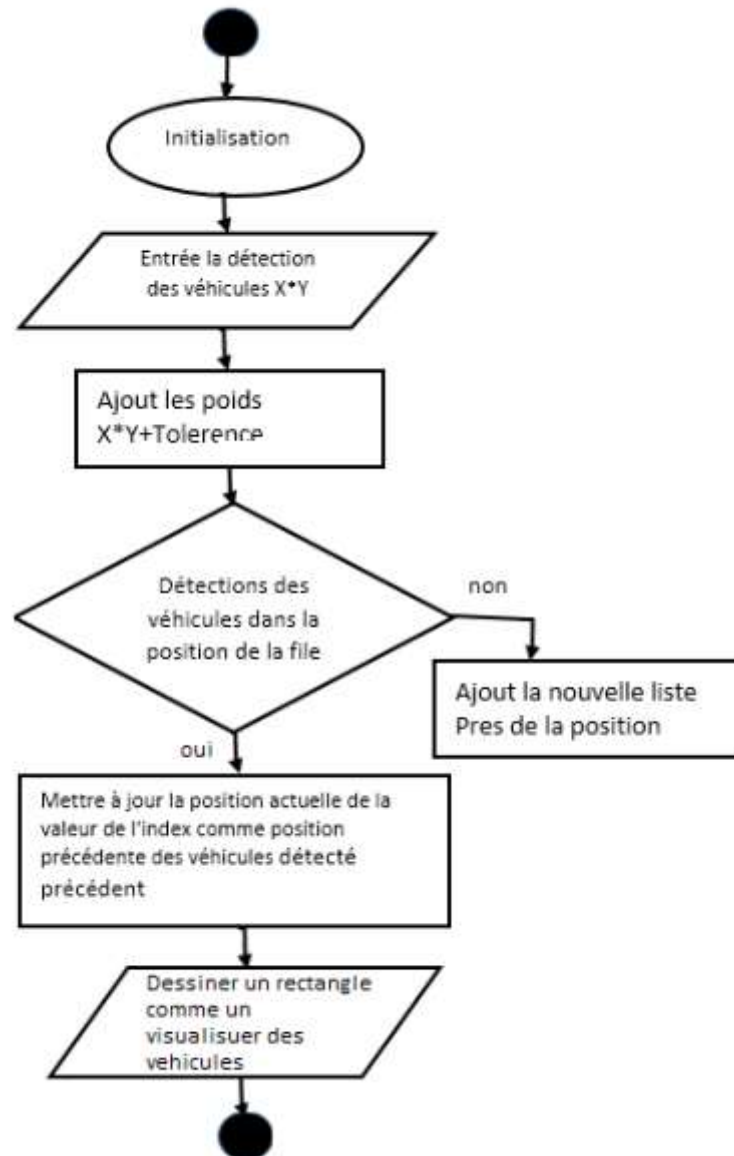
application de la cascade à chaque sous fenêtre, en commençant par le premier étage : calcul des caractéristiques pseudo Haar de l'image utilisée par le classificateur de l'étage courant, calcul de la réponse du classificateur, passage ensuite à l'étage supérieur si la réponse est positive, à la sous fenêtre suivante sinon, et enfin l'exemple est déclaré positif si tous les étages répondent positivement ; fusion des détections multiples : l'objet peut en effet générer plusieurs détections, à différentes positions et échelles ; cette dernière étape fusionne les détections qui se chevauchent pour ne retourner qu'un seul résultat.

La bibliothèque Dlib fournit également une fonction de détection appelée `get_frontal_face_detector ()` et `get_frontal_care_detector ()`, mais dans notre travail nous allons utiliser la deuxième fonction. Cette fonction renvoie un tableau rectangulaire de véhicule détecté. Un rectangle représente une zone rectangulaire d'une image du véhicule détecté. Chaque rectangle contient quatre valeurs  $x$ ,  $y$ ,  $w$  et  $h$  comme vecteur  $(x, y), (x + w, y + h)$ , ce qui signifie qu'il renvoie également les coordonnées du retour sur investissement qui contient le véhicule détecté. Il y a donc trois différences principales entre le classificateur en cascade haar et le détecteur dlib. Tout d'abord, alors que le détecteur de cascade haar renvoie un tableau numpy multidimensionnel, le détecteur dlib renvoie un tableau d'objets rectangulaires. Deuxièmement, le détecteur de cascade de haar renvoie le coin supérieur gauche avec la largeur et la hauteur. Troisièmement, le classificateur de cascade de haar prend deux paramètres supplémentaires, `scaleFactor` et `minNeighbors`.

Nous utiliserons la classe `cv: Cascade Classifier` pour détecter des véhicules dans un flux vidéo. En particulier, nous utiliserons les fonctions:

`cv: Cascade Classifier: load` pour charger un fichier de classificateur `.xml`. Il peut s'agir d'un classificateur Haar

`cv: Cascade Classifier : detectMultiScale` pour effectuer la détection.



**Figure IV.4-Diagramme d'activités de suivi des véhicules**

Le figurer IV.4 nous montrer le suivi des véhicules nous utilisons pour obtenir la position spécifique des véhicules en utilisant  $(x, y)$  pour déterminer des véhicules à l'intérieur du cadre pour être comparé à la liste des positions précédentes des véhicules suivis; cependant, de nouveaux postes ne pas inclure dans la liste des positions des véhicules suivis a été ajouté en tant que position  $(x, y)$  d'un nouvel véhicules.

Si la nouvelle position était incluse dans la liste des positions des véhicules suivis précédents, elle serait utilisée comme nouvelle position d'un véhicule reconnu. Le processus général de suivi des véhicules est présenté par l'organigramme.

Pour tester si votre système est prêt, on va appuyer sur exécuter après avoir vu le résultat de détection automatique d'un véhicule via la librairie OpenCV.

#### **IV.4.4. Algorithme de détection de véhicule**

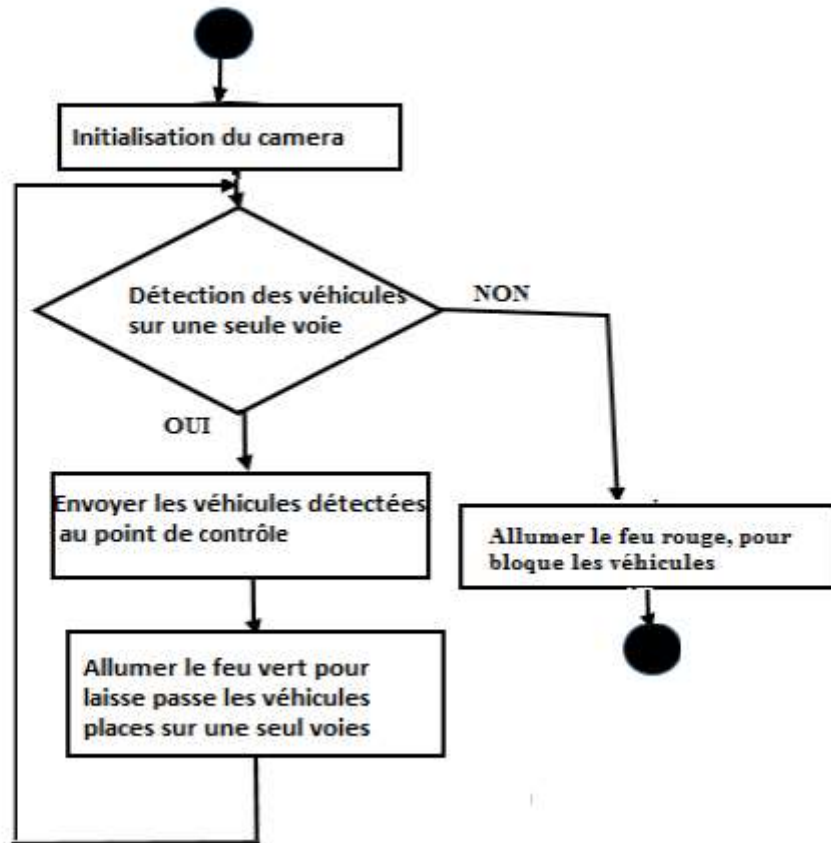
L'algorithme de détection des véhicules est subdivisé en deux parties, les caméras et le feu de circulation. La caméra permet de détecter ou surveiller le trafic routier dans une intersection. Après avoir détecté les véhicules, elle envoie les véhicules détectés en temps réel vers le contrôleur de feu pour déclencher le feu vert ou rouge selon les données reçues. Il existe deux étapes importantes dans la détection d'véhicules en mouvement, l'ordre diffère d'un algorithme à un autre [19]:

- **La maintenance de l'arrière-plan**

Cette phase consiste à mettre à jour périodiquement une image modèle considérée comme l'arrière-plan, pour pouvoir détecter les changements qui se sont produits dans la scène par la suite. L'arrière-plan constitue la partie statique de la scène qui ne doit pas être détectée comme en mouvement par l'algorithme de détection.

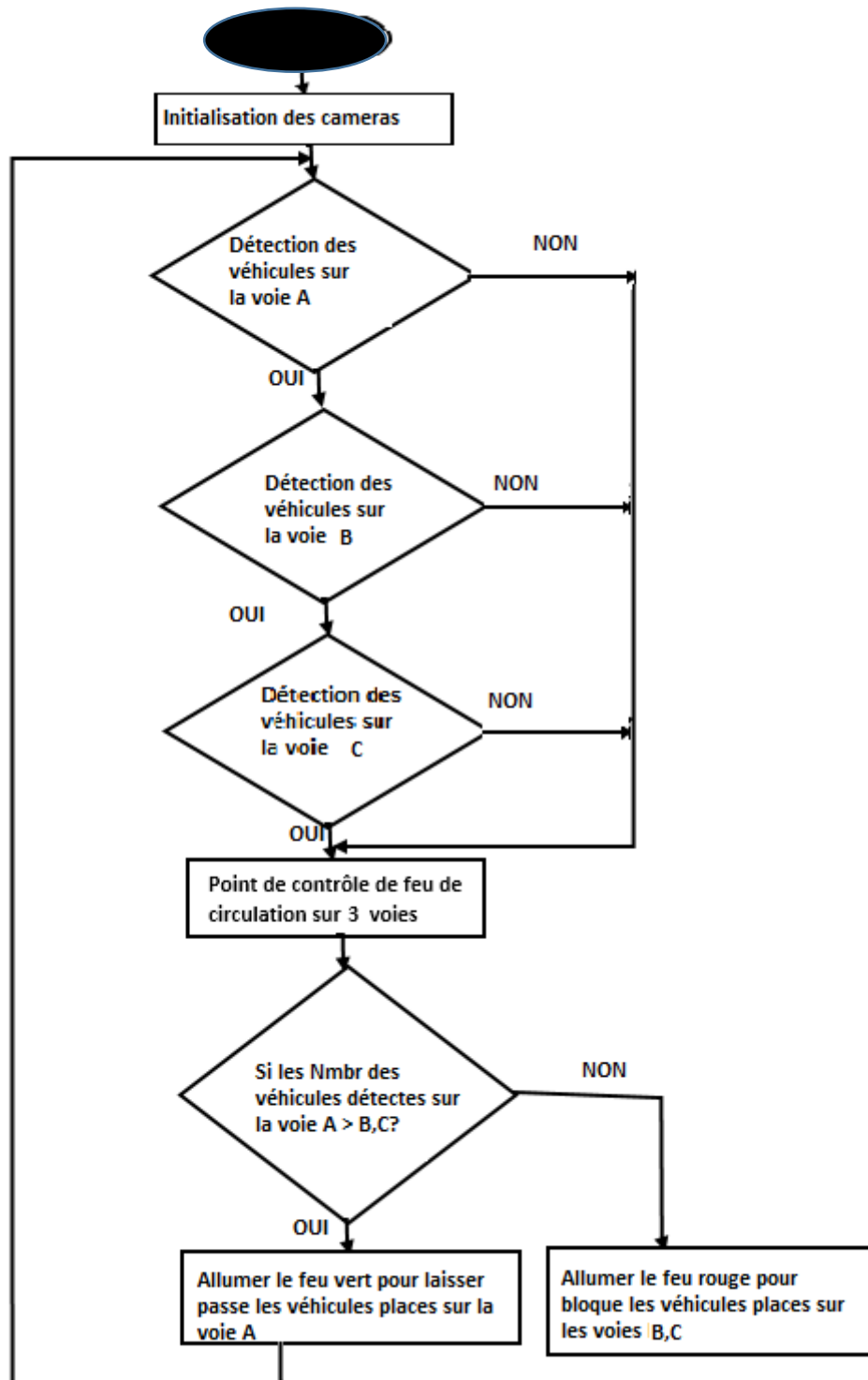
- **La détection des changements dans la scène**

Elle consiste à comparer l'image considérée comme arrière-plan avec une nouvelle image de la séquence pour voir si des changements se sont produits dans la scène.



**Figure IV.5- Algorithme d'allumer le feu de circulation sur une seule voie en temps réel**

La figure II.5 nous montre comment notre algorithme va déclenche les feux en temps réel. Notre algorithme repose aux nombres des véhicules détectés et transmis au point de control, c'est-à-dire que la camera va détecter les véhicules placés à une seule voie puis elle va directement transmettre au point de control en temps réel les données recueillies, ensuite ce dernier va allumer le feu vert pour laisser passer les véhicules à une seule voie, sinon il va les bloquer en affichant le feu rouge jusqu'avoir les nouvelles ordres d'afficher le feu vert.

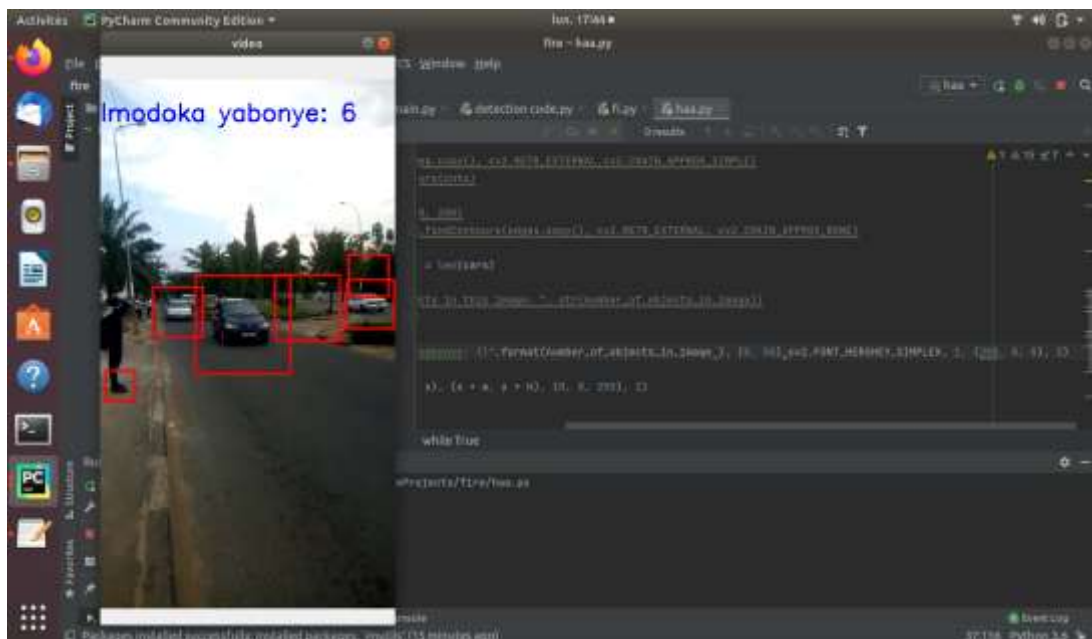


**Figure IV.6- Algorithme d'allumer le feu de circulation sur 3 voies en temps réel**

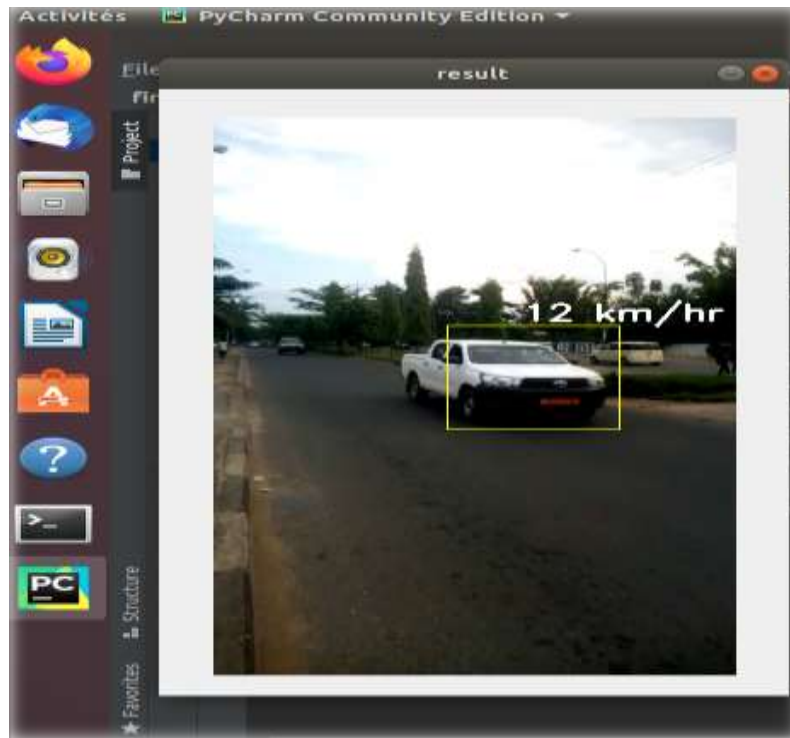
La figure IV.6 nous montre quand l'intersection est composée de 3 voies, A, B, C chaque voie est munie par une caméra de détection des véhicules bien positionnée avec un angle de 90 degré, et un capteur magnétomètre sans fil qui va jouer les rôles de détection des

véhicules en se basant par 3 axes X,Y,Z pour perturber le champ magnétique des véhicules et d'estimer la de vitesse des véhicules.

Chaque camera sera placée sur les différents voies de l'intersection, il va envoyer en temps réel les données recueillies c'est-à-dire les véhicules détectés vers le point de contrôle mais ce dernier va déclencher le feu vert (c'est à dire pour laisser passer les véhicules) selon les nombres supérieurs par rapport autres voies. Si la camera de voie A détectera les nombres des véhicules supérieurs à celles de B et C, dans ce cas le point de contrôle ordonnera le feu vert de voie A sinon le feu rouge sera allumé pour bloquer les voies B, C et vice versa. Si toutes les trois voies détectent les véhicules égaux dans ce cas le système appliquera la méthode FIFO, c'est dans le cadre d'éviter le débordement des véhicules pour une seule voie.



**Figure IV.7-Resultat des véhicules détectés en temps réel**



**Figure IV.8-Resultat d'estimation de vitesse des véhicules en temps réel**

La figure IV.8 nous montre le résultat simulé par le capteur magnétomètre sans fil que nous allons décrire dans la section (II .page 19). Pour voir ce résultat, nous avons utilisé un algorithme de cascade de haar, une fichier xml que nous avons créé puis renommée *myhaar.xml* sans oublier une petite vidéo qui nous a facilité de tourner nos codes en python sous l'interpréteur PyCharm Community édition 2020.1.1.

La méthode d'estimation de vitesse est basée, lorsqu'un véhicule rentre dans la zone de détection, puis il va perturber le champ magnétique de référence en envoyant les onde-optique et le capteur vient automatiquement détecte ces variations. Le capteur va d'estimé la vitesse de ce véhicule, puis il va enregistre la date et heure.

Le système d'estimation de vitesse, utilise des magnétomètres insérés dans la chaussée ou relier sur le poteau à côte du chausse pour détecter la présence ou en envoyant les ondes optique sur le passage des véhicules. Ces capteurs sans fil transmettent leurs variables de détection en temps réel par onde-radio à un concentrateur raccordé à un centre de gestion trafic.

En outre lors de codage nous avons importé différents bibliothèque notamment cv2, dlib, time, math sans ignorer qu'aux 15 ères lignes nous avons défini une bibliothèque estimateSpeed qui a pour rôle d'estimer la vitesse des véhicules. Le capteur va détecter la vitesse de véhicule en temps réel puis envoyé au point de contrôle et celui-là va la renvoyer au centre d'Etude et de Régulation de Trafic pour la prise de décision a ceux qui ont violé le code de conduite dans ce cas ils seront pénalise par ce code de la route.

#### **IV.4.5. Langage de programmation Python**

Python est un langage de programmation qui intègre un grand nombre des concepts de la programmation moderne. C'est un langage simple et puissant. Ceci en fait un outil adapté pour le développement d'applications de complexités diverses (de simples scripts aux applications complètes) et de domaines variés ainsi que pour l'apprentissage d'un premier langage de programmation [38].

#### **Installation de Python 3.7 sur Ubuntu avec Apt**

L'installation de Python 3.7 sur Ubuntu avec apt est un processus relativement simple qui ne prend que quelques minutes mais qui dépendra d'une connexion internet. On dégage quelques étapes pour installation :

- On commence par mettre à jour la liste des packages et en installant les conditions préalables: \$ sudo apt-get update, \$ sudo apt-get upgrade.
- Après lancer les deux commandes on va procéder de lancer une commande important pour installer python 3.7
- Une fois le référentiel activé, installez Python 3.7 avec: \$sudo apt Installe python3.7
- À ce stade, Python 3.7 est installé sur notre système Ubuntu et prêt à être utilisé. Nous pouvons faire le test en tapant dans le terminal: python3.7 –version.
- Une autre chose importante est les bibliothèques supplémentaires requises. OpenCV-Python ne nécessite que Numpy

Rappelons que NumPy est une bibliothèque pour langage de programmation Python, destinée à manipuler des matrices ou tableaux multidimensionnels ainsi que des fonctions mathématiques opérant sur ces tableaux.

Installez le package python3-OpenCV avec la commande suivante dans le terminal.

```
$ Sudo apt-get install python3-opencv
```

### **Système d'exploitation pour mieux programmer avec python**

Il fonctionne sur de nombreux systèmes d'exploitation comme: Windows, Linux (UBUNTU), depuis les mini-ordinateurs Raspberry Pi jusqu'au supercalculateur.

### **Comment programmer Raspberry avec python ?**

Pour faire clignoter une LED à l'aide d'un Raspberry Pi, il vous faut d'avoir: Un Raspberry Pi, des LEDs, des résistances (100Ω), Breadboard & câbles.

Une fois tous les éléments réunis, on va passer au branchement. Branchement d'une LED au Raspberry. Pour relier la LED au Raspberry Pi, on va avoir besoin d'une résistance. En effet, les LEDs fonctionnent avec une tension et une intensité donnée par le constructeur.

Pour programmer Raspberry avec python, il suffit de connecter la carte sur le connecteur GPIO (General Purpose Input/Output) de l'ordinateur incorporant le python puis commencer à coder en utilisant les codes appropriés pour le programme.

### **Système d'exploitation UBUNTU**

Ubuntu est un système d'exploitation GNU/Linux basé sur la distribution Linux Debian. Il est développé, commercialisé et maintenu pour les ordinateurs individuels (desktop), les serveurs (Server) et les véhicules connectés (Core) par la société Canonical.

Ubuntu se définit comme « un système d'exploitation utilisé par des millions de PC à travers le monde » et avec une interface « simple, intuitive, et sécurisée ».

## Pourquoi UBUNTU

En résumé nous avons choisi d'utiliser Ubuntu car c'est un système libre, gratuit, fiable, simple d'utilisation et basé sur philosophie humaniste. Cependant, il est très important de comprendre que c'est un système d'exploitation complètement différent de Windows dans sa conception. En Outre UBUNTU est un système d'exploitation mieux programmable pour les cartes électroniques qu'on utilise pour la conception de système intelligente (par exemple raspberry pi, camera, feu de circulation)

### IV.4.6. OpenStreetMap

OpenStreetMap (OSM) est un projet collaboratif de cartographie en ligne qui vise à constituer une base de données géographique libre du monde (permettant par exemple de créer des cartes sous licence libre), en utilisant le système GPS et d'autres données libres. Le fichier récupéré via OpenStreetMap doit avoir une *extension .osm* [Exemple Cfr la figure I.2 du chapitre I]. Netgenerate génère des réseaux routiers abstraits qui peuvent être utilisés par d'autres applications SUMO. Nous pouvons utiliser un fichier de définition de schéma XML pour configurer une configuration netgenerate: *netgenerate Configuration.xsd* [13].

### IV.5. Fichier XML

Le XML ou Extensible Mark up Language file (langage de balisage extensible en français) est un type de langage qui a été créé par le W3C (World Wide Web Consortium). Le but était de définir une syntaxe de codage de documents qui soit facilement lisible aussi bien par les humains que par les machines. Dans notre cas de simulation de trafic routier fichier XML de type *nom projet.net.xml*, peut être obtenu de multiples manières en fonction de la volonté de mise en place. Cet ensemble de possibilités peut paraître déroutant pour un utilisateur non averti, mais reste très puissant, SUMO peut mettre en place des structures plus complexes, incorporant le changement de voie, des boucles électromagnétiques, la création de types de véhicules, et bien d'autres. Deux principaux outils existent pour générer de tels réseaux sont :

- NETGEN permet de générer en ligne de commande un réseau de plusieurs formes ;

- NETCONVERT possède la capacité de générer des cartographies adaptées pour SUMO à partir de différents formats ;
- De base, il est possible de définir un ensemble de fichiers XML afin d'obtenir le réseau souhaité ;
- Tout d'abord, il est nécessaire de décomposer la carte souhaitée en un ensemble de nœuds, qui peuvent être de plusieurs types : de bordures, fictifs pour la réduction ou l'augmentation de voies, ou encore d'intersections, avec ou sans feux. Ces nœuds et leurs coordonnées respectives prennent place dans un fichier de la forme `bujumbura.nod.xml` ;
- Ensuite, un fichier `bujumbura.typ.xml` permet de mettre en place les types de routes souhaitées, incluant pour chaque type des informations telles que le nombre de voies ou encore la vitesse limite. Ce fichier de types est optionnel, les paramètres pouvant directement être indiqués lors de la construction des routes.
- Puis, un fichier `bujumbura.edg.xml` permet de relier les nœuds par des routes.
- Le fichier `bujumbura.con.xml` permet pour sa part de mettre en place les directions possibles pour chaque voie ;
- Le fichier `Bujumbura.net.cfg` permet d'indiquer tous ces fichiers en vue de la création de la carte par le programme NETCONVERT, permettant d'obtenir le fichier `bujumbura.net.xml`.
- Pour plus de confort, NET CONVERT possède l'avantage de prendre en charge de nombreux types de cartes existants, en provenance de certains simulateurs ou plateformes reconnues, telles qu'OpenDrive [12]. Particulièrement, OpenStreetMap [13] est également pris en charge : il s'agit d'une carte mondiale en partage et totalement libre, dont chacun peut contribuer à la construction ainsi qu'à exporter des données, généralement au format *.OSM*.

Après on va convertir le map récupéré par OpenStreetMap qui a une extension **.osm** en utilisant le commande: `netconvert -osm-files bujumbura.osm -0 bujumbura.net.xml` pour avoir un fichier.xml d'extension net.xml.

### IV.5.1. Simulation avec SUMO 0.32.0

Rappeler sur la section 3 du chapitre 4 dont nous avons décrit un simulateur SUMO et les outils nécessaires pour simuler notre travail.

SUMO est un simulateur open-source à temps discret, espace continu et microscopique entièrement réalisé en C++ permettant de modéliser l'écoulement du trafic routier [57].

Pour que notre simulation avec sumo existe on va passer à quatre étapes jusqu'à avoir un fichier ayant l'extension .sumocfg.

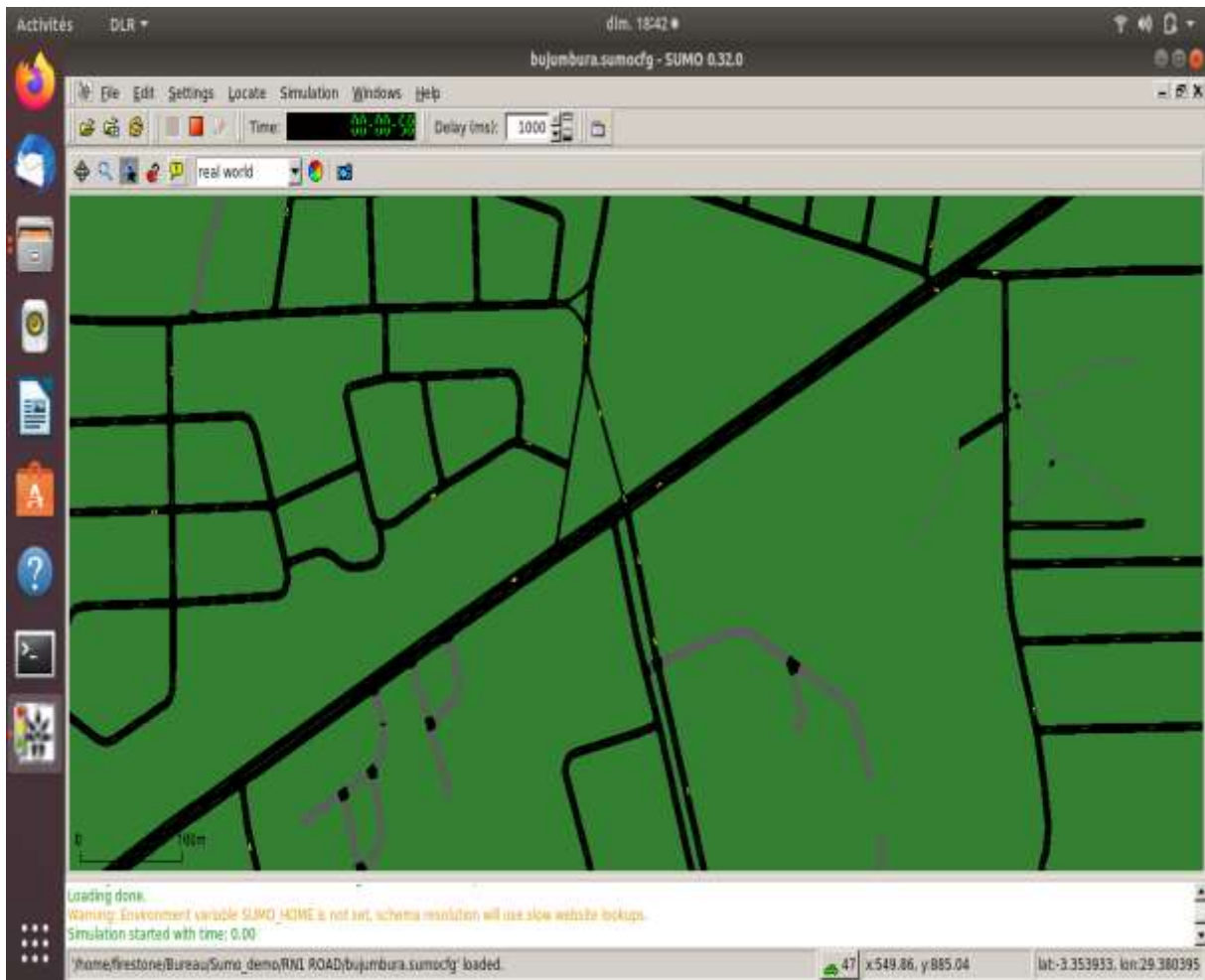
Les étapes sont :

- Récupérer le map via OpenStreetMap avec l'extension .osm ;
- Convertir le map en utilisant le commande: `netconvert -osm-files map.osm -o map.net.xml` ;
- Ajouter les routes au réseau avec *randomTrips.py*, en utilisant la commande `randomTrips.py -bujumbura.net.xml -r bujumbura.rou.xml -e 50-l`.

Une fois le réseau et les informations du trafic souhaité générées, il faut mettre en place le fichier de configuration correspondant à la simulation, de la forme `bujumbura.sumo.cfg`. Ce fichier va rassembler les deux fichiers `bujumbura.net.xml` et `bujumbura.rou.xml`, ainsi que d'autres éléments, tels que :

- Des éventuels fichiers supplémentaires (pour la définition de stops, de détecteurs, etc);
- Le temps de simulation (début et fin, en pas de programme, ajustables en millisecondes);
- Les valeurs à enregistrer : le programme générera alors en fin de simulation un ou plusieurs fichiers XML contenant les résultats.

A ce propos, de très nombreuses valeurs sont exploitables afin de pouvoir évaluer au mieux un modèle, comme par exemple les temps de parcours pour chaque véhicule étant entré dans le réseau au moment de la simulation.



**Figure IV.9-Resultat final de Simulation avec SUMO**

#### **IV.5.2. Variables de simulation**

En date du 21 ,22 au 23/03/2021, nous avons fait une visite sur terrain pour chercher les données réelles sur l'intersection du Gale du nord RN1 et celle du Nations Unis RN9. Cette visite a pour objectif de recueillir les données réelles que nous allons utiliser pour simuler notre travail.

Pendant ces visites nous avons constaté que sur l'intersection de RN 1 passe beaucoup de véhicules par rapport aux autres intersections du nord. [Voir graphique de comparaison III 1,2, 3 du chapitre III].

En outre nous avons mené une petite interview pour deux personnes placées pour différents file d'attente où l'un était placé sur la file A l'autre B, C où la conversation dure 3 minutes

il nous a dit pour quitter à l'intersection du Gale du nord aller au centre-ville prend au moins 45 min.

Alors notre simulation avait pour objectif de réduire le temps de file d'attente et le temps d'arriver au centre-ville. Les données ci-dessous nous montrent les nombres des véhicules placées sur la file d'attente.

Variables sur l'intersection du Gale du nord RN1 pour routes A et B dans les heures de pointes de l'avant midi de 6h30 minutes à 9h30 minutes.

**Tableau IV.1-Tableau de données de routes A et B**

H.de congestion	Nombres des véhicules dans la file A pendant 30 min	Nombres des véhicules dans la file B pendant 30 min
6h 30 à 7 h	270	220
7h à 7 h 30	345	302
7h30 à 8 h	410	350
8h à 8 h 30	357	268
8h 30 à 9h	307	232
9h à 9h30	181	166
Nombres totales des véhicules par routes	1.870	1.538
Nombres totales des véhicules de Routes A, B&C	3.408	

Variables sur l'intersection du Gale du nord RN1 pour routes D et E dans les heures de pointes de l'avant midi de 17h30 minutes à 19h30 minutes

**Tableau IV.2-Tableau de données de routes D et E**

H.de congestion	Nombres des véhicules dans la file D pendant 30 min	Nombres des véhicules dans la file E pendant 30min
17H30 à 18h	208	179
18h à 18h30	405	362
18h30 à 19h	371	303
19h à 19h30	250	186
Nombres totales des véhicules par routes	1.234	1.030
Nombres totales des véhicules de Routes A, B	2.264	

### IV.5.3. Résultats de simulation

Après l'exécution du programme de simulation, pour un temps de simulation:  $T_s$  simulation = 2000 secondes, avec un taux de service [voir l'équation 3.8, 3.9, et 3.10 et 3.11 du chapitre III]. Nous avons obtenu les résultats que pendant 2000 secondes notre système a évacué 1000 véhicules.

Résultat de simulation pour la file A et B dans les heures de pointes de l'avant midi au niveau de la route dédié Roi MWAMBUTSA RN1 allant vers le Boulevard de MWEZIGISABO.

**Tableau IV.3- Résultat de simulation montrant le temps moyen de la file A et B de l'avant midi**

Nombre total des véhicules dans la file A	Temps moyen d'attente en UV/min dans la file A	<b>Temps réduit Pour la file A</b>	Nombre total des véhicules dans la file B	Temps moyen d'attente en UV/min dans la file B	<b>Temps réduit Pour la file B</b>
270	8,891	<b>21,109</b>	220	7,326	<b>22,674</b>
345	11,488	<b>18,109</b>	302	10,050	<b>19,95</b>
410	13,653	<b>16,347</b>	350	11,655	<b>18,345</b>
357	11,888	<b>18,112</b>	268	8,924	<b>21,076</b>
307	10,223	<b>19,777</b>	232	7,725	<b>22,275</b>
181	6,023	<b>23,977</b>	166	5,527	<b>24,473</b>

Résultat de simulation pour la file A et B dans les heures des pointes dans l'après-midi au niveau du Boulevard Roi MWEZIGISABO allant vers la route dédié Roi MWAMBUTSA RN1 et vers les autres routes des quartiers.

**Tableau IV.4- Résultat de simulation montrant le temps moyen de la file A et B dans l'après midi**

Nombres des véhicules dans la file A pendant 30 min	Temps moyen d'attente en UV/min dans la file A	<b>Temps réduit Pour la file A</b>	Nombres des véhicules dans la file B pendant 30min	Temps moyen d'attente en UV/min dans la file B	<b>Temps réduit Pour la file B</b>
208	6,926	<b>23.074</b>	179	5,960	<b>24.044</b>
405	13,486	<b>16,514</b>	362	12,054	<b>17,946</b>
371	12,354	<b>17,646</b>	303	10,089	<b>19,911</b>
250	8,325	<b>21,675</b>	186	6,193	<b>23,807</b>

#### **IV.5.4. Interprétation des résultats de simulation**

Le Temps moyen de file d'attente des véhicules, sur l'intersection de RN1 est composé par deux routes A, B et C dans l'avant midi et deux routes A, B dans l'après-midi sont représentés respectivement dans les tableaux (IV.3, IV.4).

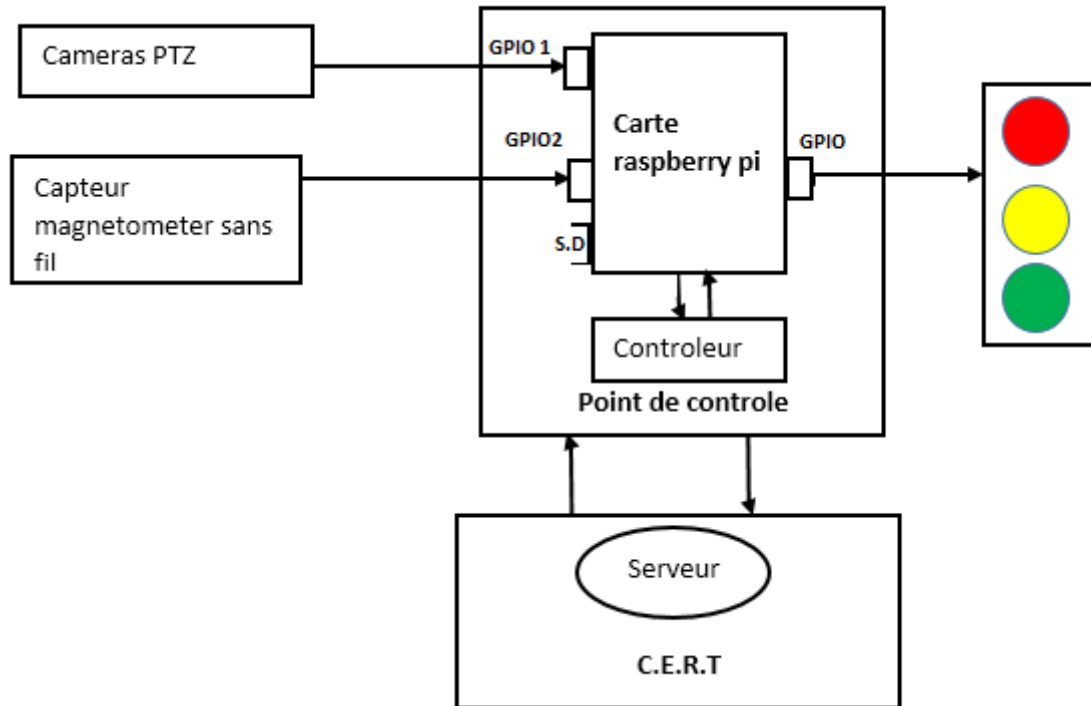
D'après les résultats obtenus, on remarque que :

- Le nombre moyen de véhicules en attente dans la file avec réseau des capteurs et les cameras est plus petit que dans le système classique ;
- Le temps d'attente dans l'ancien modèle de gestion de trafic est plus grand, ce résultat montre que la nouvelle approche est capable de gérer différents véhicules d'une manière équitable.

Donc les résultats obtenus diminuent plus de 80% de temps moyen d'attente par rapport à ces derniers. Cette amélioration est tout à fait prévisible dans la mesure où le contrôle et la gestion intelligente temps réel des feux de circulation se fait d'une manière optimale grâce aux capteurs et les cameras réagissant aux événements en temps réel.

Ce résultat est dans le but d'évaluer les performances de notre système. Nous utilisons le SUMO afin de simuler le comportement des véhicules dans la file et d'évacuer certains nombres des véhicules détectés par la cameras installée sur le poteau.

En effet, que ce soit en termes du nombre moyen de véhicules en attente dans les files ou même en termes du temps moyen d'attente des véhicules dans les files, nos résultats sont nettement plus réduits que le dernier.



**Figure IV.10- Architecture général de mon travail**

#### IV.5.5. Variable obtenus par l'architecture de notre système

D'après la figure IV.10, elle nous illustre l'architecture globale de notre système dont tous les éléments seront branchés au carte raspberry pi .celui-là sera contrôlée par un contrôleur de feu, ce figure est composé par différents éléments et les variables fournis sont différentes.

La cameras aura le rôle de détecter les véhicules placés sur la file d'attente de telle voie, le variable de cette dernière c'est à dire le nombre de véhicules détectés seront envoyer vers le point de control pour aider à la prise de décision de bloquer ou non via notre algorithme TAPIOCA sans oublier notre modèle mathématique.

N.B si l'intersection est composée par 3 voies, dans ce cas, chaque voie sera munie de sa propre cameras et son propre capteur et les variables ne sont pas identiques.

Le capteur magnétique sans fil aura le rôle de détecter des véhicules, d'estimer la vitesse des véhicules, enregistrer l'heure d'arrivée des véhicules. Ainsi ces variables nous aiderons de connaitre l'excès de vitesse et le temps de passe de ce véhicule. Les avantages de ces variables de capteur seront utilisés pour sanctionner le conducteur via le code de conduite

de la route et aideront le gouvernement en cas de prise de décision sur les autres intersections.

#### **IV.6. Conclusion**

La technologie des réseaux de capteurs s'est beaucoup développée durant ces dernières années et son impact sur les réseaux routiers urbains peut être d'une grande importance. Dans un premier temps, nous avons modélisé une seule intersession principale, les deux autres seront comme orientation des véhicules en cas de débordement sur ce dernier. Grâce à la théorie de file d'attente et leur réseau, nous allons moderniser la gestion du trafic routier. Finalement, nous avons prouvé l'efficacité de la gestion du trafic routier urbain basée sur notre stratégie de gestion temps réel des feux de signalisation du trafic routier. En effet, pour que notre système de simulation soit mis en application, nous avons utilisé beaucoup de techniques nécessaires comme, le STI, RCSF, la cameras utilise dans la détection temps réel les véhicules sans oublier le modèle mathématique de la théorie de file d'attente, utilisé pour connaître le temps d'attente des véhicules, le temps de feux vert et rouge sans rien oublier le temps moyenne d'arrivée des véhicules.

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATION

### Conclusion Générale

La congestion du trafic routier urbain est l'un des problèmes socio-économiques dans le développement du pays qui doivent être résolus pour supporter l'évolution de la société et du pays en général. La solution appropriée est de trouver des algorithmes de contrôle de feux de signalisation où nous avons utilisé l'algorithme TAPIOCA afin de prévenir l'apparition de la congestion routière. L'objectif de notre étude est d'attaquer aux problématique de la congestion dans les heures de pointes ce dans le but de fluidifier le trafic routier, cela c'est fait grâce à une démarche s'appuyant sur des réseaux capteurs sans fil et logarithme de gestion de feux de signalisation, d'où les RCSFs localisés les équipements de signalisation routière, et facilite la communication entre les différents nœuds utilise dans notre système sans rien oublier les systèmes de transport intelligents. Au fil de ce document, nous avons tout d'abord passé en revue les principaux aspects des réseaux de capteurs sans fil. Nous avons ainsi montré que ces équipements particuliers possèdent l'avantage d'aider à la résolution des problèmes de congestion. Par la suite, nous nous sommes recentrés sur la gestion de trafic routier où nous avons faire la présentation des différents outils de gestion sans ignorer les systèmes de transport intelligents qui ont une grande avantages dans notre système on peut cites entre autre acquisition des données en temps réel. L'étude bibliographique réalisée nous a montré que les méthodes existantes pour la régulation du trafic au niveau des intersections sont peu efficaces. Une séquence de passage plus efficace sera donc nécessaire afin d'améliorer la situation du trafic routier urbain.

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

Nous avons amélioré une stratégie utilise beaucoup des auteurs dans les différents pays pour la gestion du trafic routier au niveau d'une seule ou multiple intersection. Cette

stratégie est basée sur les technologies de la communication sans fil. L'exploitation des informations récoltés grâce au RCSFs, nous ont permis de formuler une model mathématiquement de notre problème dans le but de proposer un algorithme efficace pour évacuer le maximum de véhicules présents dans les files d'attente en un temps optimal.

Afin d'appuyer notre approche, nous nous sommes proposé de faire une comparaison des variables des nombres des véhicules qui sont dans la file d'attente et celle nous avons simulée dans notre système de la simulation. D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les mesures de performances évaluées sont améliorées d'une manière significative.

Dans ce travail, nous avons modélisé un sous réseau routier par un réseau de files d'attente au niveau du routes RN1 vers au centre-ville de Bujumbura. 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). Notre étude a prouvé l'efficacité de la gestion de trafic urbain basée l'infrastructure routière utilisant les RCSFs. Nous avons simulé le modèle correspondant avec un système de contrôle dynamique.

Les résultats obtenus à partir de la simulation, nous indiquent clairement que les feux de signalisation munis des capteurs et des caméras 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.

Notre travail a permis d'explorer un nouveau domaine de recherche, aussi bien sur le plan théorique que sur le plan pratique :

- sur le plan théorique, nous avons proposé un nouveau modèle de gestion du trafic routier prenant en considération plusieurs facteurs.
- Au point de vue pratique, nous avons proposé différents outils qu'on peut nous aider de faire l'amélioration en termes de temps d'attente et du nombre de véhicules dans les files d'attente et le temps d'allumer le feu vert et rouge.

## **Recommandation**

Après avoir analysé lors de la conception du travail, beaucoup de problèmes rencontrés dans ce parcours nous avons mis en place nos recommandations qui pourraient aider lors de prise de décision pour la gestion de trafic. Nos recommandations se subdivisent en deux parties, nous adressons:

- Au Gouvernement du Burundi plus précisément à l'Agence burundaise de routes;
- A l'Université du Burundi.

### **Pour le gouvernement du Burundi**

Après avoir consulté les différents ouvrages à l'ISTEEBU concernant la démographie d'augmentation du jour au jour de la population, des véhicules au centre-ville de Bujumbura, ce qui montre que 90% de la congestion est causée par cette démographie de la population et des véhicules. Nous recommandons de mettre une centre de gestion de trafic routier qui sera collaborée avec la police routière, mettre en place immédiate un système de gestion intelligente dans tous l'intersection de la ville, mettre en place des routes superposer, construire une autre route complémentaire entrant au centre-ville pas seulement les trois routes existant ou construire un pot sur la rivière Ntakangwa reliant quartier Kigobe et Nyakabiga, un pot sur la rivière Ntakangwa reliant quartier Ngagara et Buyenzi, mettre les outils intelligents permettant de changer le centre-ville de Bujumbura une ville intelligente pour faciliter la gestion de la ville en temps réel, mettre une politique immédiate de déplacer certaines activités se trouvant au centre-ville pour se faire réaliser dans les quartiers proches du centre-ville.

### **A l'Université du Burundi**

Nous recommandons ceux-ci : Que pendant la réalisation du travail de fin d'étude de cycle de master, la direction de l'UB puisse mettre à disposition des frais de travail de mémoire au cas où le sujet réalisé par le memoranda nécessite des équipements techniques pour lui faciliter les tâches.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. A. N. SALEM/ Conception d'un protocole MAC pour la communication entre un réseau de capteur sans fil et un satellite LEO/ mai 2008.
2. Adetun djiadigun/ gestion de l'anonymat et de la traçabilité dans les réseaux véhiculaires sans fil/en février 2014.
3. étude urgente sur le transport urbain à Bujumbura dans la république du Burundi réaliser par l'agence japonaise de coopération internationale (rapport final de l'ISTEEBU de 2018) /en 2007.
4. David Guilbert/ Analyse et classification des signatures des véhicules provenant de capteurs magnétiques pour le développement des algorithmes “ Intelligents ” de gestion du trafic. Traitement du signal et de l'image/ en 2015.
5. F. YAN/Contribution à la modélisation et à la régulation du trafic aux intersections : Intégration des communications Véhicule Infrastructure/en Mars 2012.
6. G. Chalhoub/Routage et MAC dans les réseaux de capteurs sans fil/en novembre 2010.
7. <https://d-clics.laligue24.org/tutoriel/raspberry/51-introduction-fonctionnement-du-raspberry-pi-3> 4/4/2021.
8. [https://fr.wikipedia.org/wiki/OpenCV#Algorithmes\\_d'apprentissages](https://fr.wikipedia.org/wiki/OpenCV#Algorithmes_d'apprentissages) 4/4/2021
9. <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/projnum/2019/d%C3%A9tection-dvéhicules-avec-python-opencv/introduction> 6/1/2021.
10. <https://sumo.dlr.de/docs/netconvert.html> 6/1/2021.
11. <https://www.actuia.com/contribution/jeancharlesrisch/segmentation-et-detection-dvéhicules-en-temps-reel-avec-tensorflow> 2/2/2021.
12. <http://www.opendrive.org/download.htm> 2/2/2021.
13. <http://www.openstreetmap.or>, accede le 2/2/2021.
14. J. ABDO/Construire de nouvelles infrastructures routières la solution à la congestion du trafic/ en Décembre 2011.
15. K. BEYDOUN/ conception d'un protocole de routage hiérarchique pour les réseaux de capteurs/ en 2009.

16. Leila Imane NIAR/Analyse graphique pour la surveillance dans un réseau de capteurs sans fils avec un simulateur OMNET++/en 2012.
17. Maissa Abdallah /Ordonnancement temps réel pour l'optimisation de la Qualité de Service dans les systèmes autonomes en énergie/en 2014.
18. Mlle. OUESSAI ASMAA/Estimation des paramètres de trafic routier par vision artificielle /Année universitaire : 2011-2012.
19. M. DIOURI/Réseaux de capteurs sans fil : routage et sécurité/en 2010.
20. Mlle HADDADI Kahina & Mlle KACI Kahina/ Modélisation et simulation du trafic routier à l'aide des réseaux de capteurs sans fils/ en Juin 2013.
21. Mohamed tlig /coordination locale et optimisation distribuée du trafic de véhicules autonomes dans un réseau routier/en mars 2001.
22. Mr. Horoun Amine/ gestion de trafic urbain dans la ville de Setif à l'aide des réseaux capteur sans fil /2016.
23. Mr Azzedine BEKDOUCHE/ Réseaux de Capteurs Sans Fil pour Surveillance et Gestion en temps Réel du Trafic Routier / Octobre 2013.
24. N. Nadim/Conception et modélisation d'un émulateur de réseaux de capteurs sans fils/ 2012.
25. S. Sentilles/ Architecture logicielle pour capteurs sans-fil en réseau /en 2009.
26. Sébastien Faye/Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil Sébastien Faye/en Mars 2012.
27. Sébastien FAYE/ Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil/ Thèse P.H.D, LTCI/ en Décembre 2011.
28. Sébastien faye /contrôle et gestion du trafic routier urbain par un réseau de capteurs sans fil/ en 2014.
29. Sébastien faye/ rapport technique/ contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil/en février 2011.
30. Sébastien Faye/ Contrôle et gestion du trafic routier urbain par un réseau de capteurs sans fil. Infrastructures de transport/ Télécom Paris Tech, Novembre 2016.
31. Guebert & G. Sparks/ Timing plan sensitivity to changes in platoon dispersion settings. In Traffic Control Methods/ California en 1990.

32. H. Karl & A. Willig/ Protocols and architectures for wireless sensor networks/en 2005.
33. Mlle haddadi Kahina & Mlle Kaci Kahina/ modélisation et simulation du trafic/juin 2013.
34. Nasser & H. Rowaihy/ Simulation of dynamic traffic control system based on wireless sensor network/ en Mars 2001.
35. NOR Imane & SIDHOUM Souad / Développement d'une application de détection et de reconnaissance de plaques d'immatriculation(LAPIA)/en Juillet 2017.
36. Patrick Fuchs & Pierre Poulain/ Cours de Python/ du 9 octobre 2020.
37. Pierre. LUC & Grégoire. GIRARD/ Communication inter-véhicules et route-a-véhicule Apprentissage de la communication inter-véhicules Centre d'études sur les réseaux/ les transports, l'urbanisme et les constructions publiques : les temps de parcours Estimation, diffusion et approche multimodale/ en Avril 2008.
38. S.BOUZOUZOU & 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/ en 2011.
39. A. Kesharwani & V. Sadaphal & M. Natu/ Empowering bus transportation system using wireless sensor networks/ December 2010.
40. Alloua Imane & Djouder Amel/ Gestion de Trafic Urbain à base de Réseau de Capteurs sans Fil / en 2012.
41. HADDADI Kahina & KACI Kahina/ Modélisation et simulation du trafic routier à l'aide des réseaux de capteurs sans fils /en juin 2013.
42. K. YOUSEF & J. AL-KARAKI & A. SHATNAWI/ Intelligent traffic light flow control system using wireless sensors networks/ en 2010.
43. Mlle HADDADI Kahina & Mlle KACI Kahina/ Modélisation et simulation du trafic routier à l'aide des réseaux de capteurs sans fils/ en Juin 2013.
44. WANG AND A & CHANDRAKASAN/ Energy-efficient DSPPS for wireless sensor networks. IEEE Signal and Processing Magazine/ en Juillet 2002.
45. Sébastien Faye & Claude Chaudet/ Characterizing the Topology of Urban Wireless Sensor Network for Road Traffic Management/ en. 2014.

46. A. García, & J. Martínez & P. López/ Wireless sensor network-based system for measuring and monitoring road traffic/ 2008.
47. B. Zhou & J. Cao & X. Zeng & H. Wu/ Adaptive Traffic Light Control in Wireless Sensor Network-Based Intelligent Transportation System/ Dans : Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010).
48. B. ZHOU & J. CAO & X. ZENG & H. WU/ Adaptive traffic light control in wireless sensor network-based intelligent transportation system /en 2010.
49. Christian. Buisson & Jean & B. Lesort/ Comprendre le trafic routier méthodes et calculs/en avril 2010.
50. F. BOILLOT & J. BLOSSEVILLE & J. LESORT & V. MOTYKA & M. PAPAGEORGIOU & S. SELLA/ Optimal signal control of urban traffic networks /en 1992.
51. F. Doetzer & F. Kohlmayer & T. Kosch & M. Strass Berger/ Secure communication for intersection assistance/ en Mars 2005.
52. J.J. Henry & J.L. Farges & J. Tuffal /The prodyn real time traffic algorithm/ 1984.
53. Khalil M. Yousef & Jamal N. Al-Karaki & Ali M. Shatnawi/ Intelligent Traffic Light Flow Control System Using Wireless Sensors Networks/ en mai 2010.
54. Martínez & P. Lopez/ Wireless sensor network-based system for measuring and monitoring road traffic/ en 2008.
55. M. Behrisch & L. Bieker & J. Erdmann & D. Krajzewicz/ Sumo - simulation of urban mobility: An overview/ en October. 2011.
56. M. CARDEI & M. T. THAI & Y. LI & ANDW. WU/ Energy-efficient target coverage in wireless sensor networks. In Proceedings of IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)/en 2005.
57. Mille HADDADI Kahina & Mille KACI Kahina Modélisation et simulation du trafic routier à l'aide des réseaux de capteurs sans fils/ juin 2013.
58. Mario ARENAS & Didier BOLDO & Sylvain BLAIRON & Laurent ULPAT/ Système innovant non-intrusif de mesures haute température pour le fluide et la paroi de conduites/ en 2015.