RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie électrique

Spécialité : Systèmes Intelligents et Communicants

THEME

SURVEILLANCE DU TRAFIC ROUTIER URBAIN PAR UN RÉSEAU DE CAPTEURS SANS FIL

Dirigé par :

Dr. Mohamed OULD ZMIRLI

Présenté par :

Mr. Oussama BENZAID

Mr. Ishak BOUYAHIA

Année universitaire 2014/2015

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents qui ont sacrifié pour moi plus qu'il
Faut, que mon DIEU les garde.

Mes chers frères FOUAD et MOHAMED et ADEL

Mes chères sœurs et toute la famille.

Et ma future femme : AHLAM HACEINI

Et Mon Binôme : ISHAK et sa famille

Mes chers amis : YACINE-BENHAMOUDA, YACINE-OMARI
ABDOU, LYES, RAFIK,, IBRAHIM-BENTAGRI
ISHAK-SITA,
A mes amies : SIHAM, MERIEM, RABAB

Et à toute la famille de faculté des sciences et de la technologie
Et spécialement Département de Génie électrique et de l'informatique

Et à toute la promo SIC (2014-2015)



OUSSAMA

Dédicace

Je voudrais dédier cet humble travail à toute ma famille

A ma chère maman et mon chère père qui m'ont tant tout soutenu et

Encouragé dans tous les domaines et surtout pour réaliser ce mémoire, qui ont

Veillé à ce que j'étais et ce que je suis devenu maintenant

A mes chère Frères Ali et Ismail. A mes chère Sœurs Maroua et Safaa

A mes belles-sœurs Amina et Basma

A ma petite princesse Meriouma

Que YOUSRA (RABI YJADREK) reçoive mes sincères remerciements pour tous ces encouragements Et pour m'avoir soutenu tout au long de ce travail de thèse

A mon chère Binôme : OUSSAMA el WERD et sa famille

A mes chèrs amis : YACINE H , SIDALI B , ABDOU , ISMAIL

LEO , RAFIK

A mes chères amies : SIHAM, MERIEM , RABAB

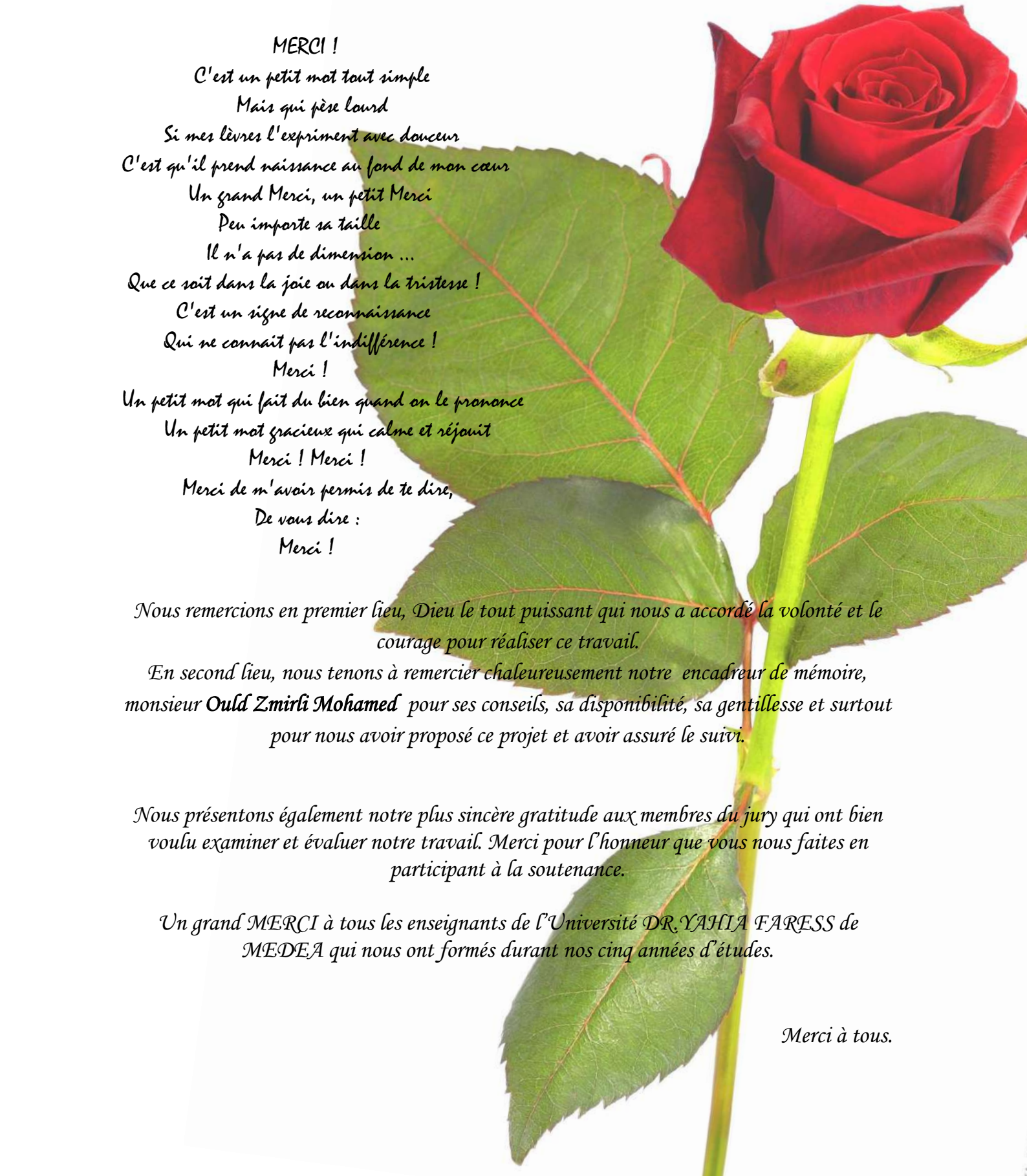
A tous mes collèges de la section SIC

Et tous les gens qui n'ont pas été mentionnés



ISHAK

Remerciement



MERCI !
C'est un petit mot tout simple
Mais qui pèse lourd
Si mes lèvres l'expriment avec douceur
C'est qu'il prend naissance au fond de mon cœur
Un grand Merci, un petit Merci
Peu importe sa taille
Il n'a pas de dimension ...
Que ce soit dans la joie ou dans la tristesse !
C'est un signe de reconnaissance
Qui ne connait pas l'indifférence !
Merci !
Un petit mot qui fait du bien quand on le prononce
Un petit mot gracieux qui calme et réjouit
Merci ! Merci !
Merci de m'avoir permis de te dire,
De vous dire :
Merci !

Nous remercions en premier lieu, Dieu le tout puissant qui nous a accordé la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

En second lieu, nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur de mémoire, monsieur ***Ould Zmirli Mohamed*** *pour ses conseils, sa disponibilité, sa gentillesse et surtout pour nous avoir proposé ce projet et avoir assuré le suivi.*

Nous présentons également notre plus sincère gratitude aux membres du jury qui ont bien voulu examiner et évaluer notre travail. Merci pour l'honneur que vous nous faites en participant à la soutenance.

Un grand MERCI à tous les enseignants de l'Université DR.YAHIA FARESS de MEDEA qui nous ont formés durant nos cinq années d'études.

Merci à tous.

ملخص

يعرض هذا العمل على تطوير نظام مراقبة شبكة الطرق من خلال شبكة استشعار لاسلكية القائمة على أداة EZ430RF2500 من تكساس انسترومنتس

ويتكون هذا النظام من محطة قاعدة و عقدتين أجهزة استشعار . يتم توصيل كل واحد منهم مع وحدة الأشعة تحت الحمراء.

المحطة الأساسية متصلة بجهاز كمبيوتر لاسترداد البيانات و عرض قياسات حركة المرور على الطرق الواردة من عقدتي أجهزة الاستشعار .

الكلمات المفتاحية

شبكة الاستشعارات اللاسلكية ، مراقبة ، الحركة المرورية .

Abstract

This work presents the development of a road network monitoring system through a wireless sensor network based on eZ430-RF2500 Kit from Texas Instruments.

This system consists of a base station and two nodes sensors. Each of them is connected with an infrared module. The base station connected to a PC retrieves the data and displays the road traffic measurements received from the two sensors nodes.

Key word

Wireless sensor network, WSN, monitoring, road traffic.

Résumé

Ce travail présente la mise au point d'un système de surveillance du réseau routier par un réseau de capteurs sans fil à base d'un Kit eZ430-RF2500 de Texas Instruments.

Ce système est constitué d'une station de base et de deux nœuds capteurs. Chacun d'entre eux est relié avec un module à infrarouge. La station de base reliée à un PC récupère les données et affiche les mesures du trafic routier reçues de la part des deux nœuds capteurs.

Mots Clés

Réseau de capteur sans fil, RCSF, WSN, surveillance, trafic routier.

Sommaire

Liste d'acronymes v
Liste des Figures vi
Liste des Tableaux viii
Introduction générale 1

Chapitre I : Méthodes de mesure des variables de trafic routier

I.1. Introduction 3
I.2. Définition du trafic routier 4
I.3. Les capteurs routiers classiques 5
I.3.1. Le tuyau pneumatique 5
I.3.2. Les boucles électromagnétiques 6
I.3.3. Les capteurs magnétiques 9
I.3.4. Le capteur à hyper fréquence (RADAR) 12
I.3.5. Les appareils à visée LASER 13
I.3.6. Le capteur piézo-céramique 13
I.3.7. Les capteurs vidéo 15
I.4. Utilisation de la photographie aérienne 17
I.5. Nouveaux capteurs à diffusion plus restreinte ou en développement 17
I.5.1. Les capteurs à ultrasons 17
I.5.2. Utilisation de la fibre optique 18
I.6. Conclusion 19

Chapitre II : Contrôle du trafic routier par un réseau de capteur sans fil (WSN)

II.1. Introduction 20
II.2. Les systèmes de transport intelligent 20
II.2.1. Présentation 20
II.2.2. Etendue 20
II.2.3 Contexte et application 21
II.2.3.1 Les centres d'ingénierie et de gestion du trafic 21
II.2.3.2 Intersection [CL90 ,WY02 ,SC04] 21
II.2.3.3 Les voies spéciales [NHM04, NHS07, AKS010] 22
II.2.3.4 Le stationnement [VRT010] 22
II.2.3.5 La sécurité [TEOV] 23

II.2.3.6 Les ronds_points [BLW011, PSCS09, XZHZ09] 23
II.2.3.7 Rapport à la pollution 23
II.2.4 Vers une approche dynamique 23
II.2.4.1 Présentation 23
II.2.4.2 Les systèmes de gestion classiques des feux de circulation 24
II.2.4.3 Étude matérielle [LAK07] 26
II.2.5 Vers une approche décentralisée 27
II.3 Les réseaux de capteurs sans fil 28
II.3.1 Technologies des capteurs 29
II.3.2 Architecture d'un capteur sans fil 29
II.3.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil 30
II.3.4 Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs 31
II.3.4.1 Le plan de gestion d'énergie 31
II.3.4.2 Le plan de gestion de mobilité 31
II.3.4.3 Le plan de gestion des tâches 32
II.3.5 Les couches de la Pile protocolaire [SAM10] 32
II.3.5.1 Couche application 32
II.3.5.2 Couche transport 32
II.3.5.3 Couche réseau 33
II.3.5.4 Couche liaison de données 33
II.3.5.5 Couche physique 33
II.3.6 Objectifs de base [BEN06] [BEN07] 33
II.3.7 Contraintes et facteurs de conception de RCSF 34
II.3.8 Domaines d'application 36
II.4 Conclusion 37

Chapitre III : Réalisation du système de surveillance du trafic routier

III.1. Introduction 38
III.2. Solution adoptée 38
III.3. Module capteur utilisé [EDNK] 39
III.4. Présentation du kit eZ430 RF2500 40
III.4.1. Contenu du kit eZ430 RF2500 41
III.4.2. Caractéristiques des composants de base 43
III.4.3. Protocole SimpliciTI [HAIE] 44

III.5. Développement du projet sous l'IAR Embedded Workbench 45
III.5.1 Création du projet 45
III.5.2 Construction et chargement du projet dans les nœuds « AP » et « ED » sous IAR 46
III.6. Organigrammes des programmes des nœuds AP et ED 47
III.6.1. Organigramme du programme du point d'accès (AP) 47
III.6.2. Organigramme du programme du nœud capteur (ED) 49
III.7. Test pratique du système globale de contrôle du trafic routier sur PC 50
III.8. Conclusion 52
Conclusion générale 53
Références Bibliographiques 54

Liste des acronymes

ADC	Analog to Digital Converters
AP	Access Point
CCE	Code Composer Essentials
CPU	Central processing unit
DAI	Détection Automatique d'incidents
DAB	Détection Automatique de Bouchon
ED	End Device
IBM	International Business Machines
I2C	Inter Integrated Circuit
IrDA	Infrared Data Association
IDE	Environnement de Développement intégré
LPM	Low Power Magnetometer
MEMS	Microsystème électromécanique
MCK	l'horloge maîtresse
PMV	Panneaux à Messages Variables
RCSF	Réseau de Capteurs Sans Fil
RF	Radio frequency
SCATS	ydney Coordinated Adaptive Traffic System
SCOOT	Split Cycle Offset Optimization Technique
SIREDO	Système Informatisé de Recueil de Données
SMCLK	Sub-main clock
SPI	Serial Peripheral Interface
SQDDP	Sensor query and data dessiminitation protocol
STI	Système de transport intelligent
TADAP	Task assignement and data advertisement protocol
USB	Universal Serial Bus
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UTCS	Urban traffic control software
WSN	Wireless Sensor Network

Liste des figures

Figure I.1. Capteurs au sol Capteurs aériens. 4
Figure I.2. Le tuyau pneumatique. 6
Figure I.3. La boucle électromagnétique. 6
Figure I.4. Exemple d'implantation de boucles sur une chaussée à 2 voies. 7
Figure I.5. Schéma de fonctionnement de boucle électromagnétique. 7
Figure I.6. Exemple de mesure de vitesse 2 boucles par voie. 8
Figure I.7. La Chaine de mesure... 8
Figure I.8. La détection des essieux.. 9
Figure I.9. Variation du champ magnétique par un mobile 9
Figure I.10. Capteur magnétique fixé au milieu de la voie de circulation... 10
Figure I.11.Composition de 2 capteurs posés par voie « Système Strela ». 11
Figure I.12. La position de capteur a hyper fréquence « RADAR »... 12
Figure I.13. Le radar MESTA 206... 13
Figure I.14. Principe de capteur piézo-céramique. 13
Figure I.15. Installation de capteur piézo-céramique... 14
Figure I.16. Les capteurs vidéo... 16
Figure I.17. Franges d'interférences... 18
Figure I.18. Synoptique du capteur à fibre optique... 19

Figure II.1. Modèle de carrefour généralement utilisé dans la littérature... 22
Figure II.2. Les composants d'un nœud capteur [ASC02, SNB08]... 29
Figure II.3. Architecture de communication d'un RCSF [ASC02]. 30
Figure II.4. Pile protocolaire [SNB08]... 31

Figure III.1. Schéma de principe du système réalisé. 38
Figure III.2. Module E18-D80NK-N... 39
Figure III.3. Kit du développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments.... 40
Figure III.4. Nœud capteur sans fil : MSP430-RF2500 avec module d'alimentation 40
Figure III.5. Entrées/sorties du support batterie et du nœud eZ430-RF2500... 41
Figure III.6. Consommation du courant pour chaque mode. 44
Figure III.7. Couches logiques du protocole SimpliciTI.... 44

Figure III.8. Capture d'écran du projet réalisé sous l'environnement IAR..... 46
Figure III.9. Organigramme principal du programme de l'AP..... 48
Figure III.10.Organigramme du traitement des trames en attente au niveau de l'AP 49
Figure III.11.Organigramme du programme du nœud capteur (ED) 50
Figure III.12.Emplacement des modules capteurs E18-D80NK-N 51
Figure III.13.Interface avant exécution 51
Figure III.14.Interface après exécution 52

Liste des Tableaux

Tableau I.1. Les résultats de l'étalonnage des capteurs... 14
Tableau III.1. Désignation des entrées/sorties du support batterie..... 41
Tableau III.2. Entrées/sorties du connecteur d'un nœud eZ430-RF2500... 42

Introduction Générale

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. Le phénomène le plus marquant dans le trafic routier est la congestion qui alimente de nombreuses discussions d'usagers. Depuis une cinquantaine d'années, cependant, des théoriciens du trafic cherchent à comprendre et quantifier les mécanismes à l'œuvre.

La qualité de l'exploitation d'un réseau de voirie urbaine ou semi urbaine dont les services de gestion de trafic ou d'information usagers, dépend grandement de la quantité de capteurs trafic installés, de la qualité des emplacements retenus et enfin de la fiabilité et de la précision des mesures produites.

Le milieu urbain est équipé d'une forte densité de carrefours à feux. Le besoin premier pour un exploitant est de percevoir à travers les mesures recueillies, la charge du trafic en temps réel, par mesure de remontées de files de véhicules à une centaine de mètres en amont des feux.

Le recueil des temps de parcours, est également l'une des préoccupations d'un exploitant de voirie urbaine car il s'agit d'une mesure simple à appréhender pour le grand public et qui est commune à tous les modes de transports. Elle permet donc la comparaison immédiate de leurs performances respectives, à toutes heures. En conséquence, elle a donc un intérêt important pour :

- informer le grand public sur les conditions de circulation;
- évaluer les conséquences sur le trafic routier de la mise en place de nouvelles infrastructures de transport et donc de l'impact de la mise en œuvre de la politique publique;
- produire une information complémentaire pour la gestion temps réel du trafic au PC de régulation pour les points singuliers.

Les comptages de véhicules regroupent différents appareils électriques ou électroniques qui sont conçus pour compter le nombre de passages de véhicules sur les voies de circulation ou dans les parcs de stationnement. Les appareils de comptages de véhicules

sont faits pour des véhicules à deux roues, des voitures légères, des camionnettes, des poids lourds et tant d'autres. Selon les modèles, les données recueillies sur les appareils de comptage de véhicules peuvent être stockées et traitées par des équipements informatiques.

Le média hertzien offre en effet des propriétés uniques, qui peuvent être résumées en trois points : la facilité du déploiement, l'ubiquité de l'information et le coût réduit d'installation. Au cours de son évolution, le paradigme sans fil a vu naître diverses architectures dérivées, telles que : les réseaux cellulaires, les réseaux locaux sans fils et autres.

Durant cette dernière décennie, une architecture nouvelle a vu le jour : les réseaux de capteurs sans fil. Ce type de réseaux résulte d'une fusion de deux pôles de l'informatique moderne : les systèmes embarqués et les communications sans fil. Un réseau de capteurs sans fil (RCSF), ou "Wireless Sensor Network" (WSN), est composé d'un ensemble d'unités de traitements embarquées, appelées "motes", communiquant via des liens sans fil. Le but général d'un WSN est la collecte d'un ensemble de paramètres de l'environnement entourant les nœuds capteurs, telles que la température ou la pression de l'atmosphère, afin de les acheminer vers des points de traitement.

La suite dece manuscrit est constituée de 3 chapitres et organisé de la manière suivante:

- Dans le premier chapitre nous commençons par la présentation les différentes méthodes de mesure des variables de trafic.
- Dans le deuxième chapitre nous présentons le contrôle du trafic routier par réseau de capteur sans fil (WSN).
- le troisième chapitre et le dernier sera consacré à la réalisation du système de surveillance du trafic routierbasé sur le kit Ez430-RF2500.
- Enfin nous terminons par une conclusion.

CHAPITRE I : METHODES DE MESURE DES VARIABLES DE TRAFIC ROUTIER

I.1. Introduction

La mise en œuvre effective de toute action d'exploitation s'appuie sur la connaissance des trafics et des perturbations qui peuvent être constatées, quel que soit le type de réseau : urbain, de campagne ou autoroutier.

Les mesures de trafic se sont progressivement développées pour répondre à différents objectifs :

- adéquation entre offre et demande, support des études de trafic.
- politiques d'entretien des réseaux.
- stratégies de régulation et gestion des flux en temps réel.
- détection des perturbations.
- évaluation des nuisances et suivi d'indicateurs de sécurité routière.
- évolution de la circulation des poids lourds et des vitesses pratiquées.
- information des usagers.

Pour répondre à ces demandes, on a vu émerger ces dernières années de nouveaux capteurs et de nouvelles techniques de recueils de données.

Avec le développement de la *télématique routière*, les véhicules sont de plus en plus en liaison avec des systèmes de localisation automatique et de fourniture de données en temps réel. Ils sont aussi à l'origine d'un nouveau type de recueil de données avec possibilité de les transmettre.

Pour accéder aux paramètres caractérisant le trafic, l'élément de base est le capteur. La première catégorie de capteurs comprend tous les capteurs classiques implantés dans les chaussées, donc qualifiés d'intrusifs. Quelques capteurs non intrusifs tels que l'infrarouge ou l'ultrason permettent également d'accéder à ces paramètres. La seconde catégorie de capteurs comprend majoritairement des capteurs non intrusifs à base de rayonnement hyperfréquence ou de vidéo. Pour la troisième classe, les capteurs sont connus puisqu'ils équipent déjà les véhicules mais la réception des mesures dépend des moyens de communication et de traitement qui seront utilisés (Figure I.1).

Il existe de nombreux types de capteurs permettant la mesure directe ou indirecte des variables de circulation. Ces capteurs sont généralement des éléments transducteurs, sensibles à la grandeur physique que l'on veut saisir : présence, passage, vitesse d'un véhicule,... Le capteur traduit l'information en un signal élémentaire, transmis au détecteur, le signal reçu est transformé en une information électrique simple, significative du paramètre de circulation *[BJM88] [PH90]*.

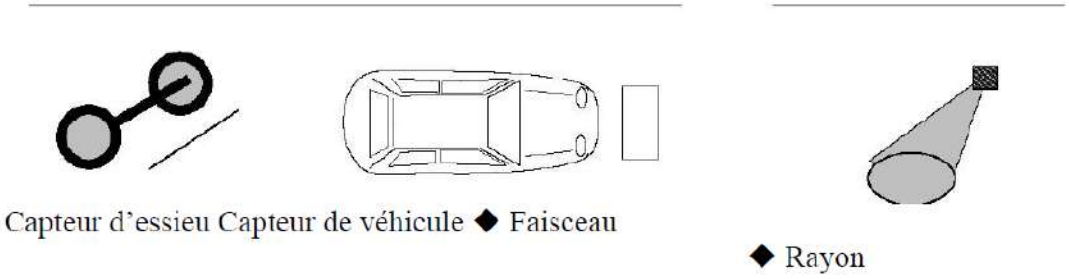


Figure I.1. *Capteurs au sol Capteurs aériens.*

I.2. Définition du trafic routier

Le trafic routier résulte de la circulation de véhicules très divers qui peuvent être considérés de façon individuelle ou collective. Pour diverses raisons, on peut s'attacher aux caractéristiques de chaque véhicule (dimensions, poids, vitesse) ou analyser la dynamique d'un ensemble de véhicules constituant un flot (vitesse moyenne, intervalle entre les véhicules).

Le trafic se définit par des paramètres élémentaires dont la définition est en fait liée aux possibilités des capteurs correspondants *([BJM88 , PH90])* .

Selon l'objectif des mesures, on peut enregistrer les caractéristiques de chaque véhicule, ou d'une typologie particulière de véhicules. Les paramètres qualifiant la circulation peuvent être mesurés de façon temporaire (de quelques heures à quelques semaines) ou de façon permanente.

On définit aussi une séquence correspondant à la périodicité d'agrégation des mesures :

- de quelques secondes à 6 mn pour les actions en temps réel
- de 15 mn à l'heure pour les études de capacités et les études de bruit
- du jour au mois pour les archives statistiques, les prévisions.

Les paramètres mesurés peuvent se classer dans 3 grandes catégories regroupant :

- Les caractéristiques des véhicules :
  Longueur, hauteur, poids, nombre d'essieux.
- La dynamique des flux de véhicules :
  Débits, vitesses, temps inter-véhiculaire, taux d'occupation de la chaussée.
- Position latérale et les événements.

Si cela ne constitue pas en toute rigueur une mesure du trafic, sa détection peut être d'un grand intérêt pour l'exploitation de la route soit en regard de la sécurité (accident), soit dans l'objectif du maintien de la capacité (véhicule arrêté, bouchon). Parmi les événements, certes extérieurs, il faut aussi citer les conditions météorologiques. *([BJM88]).*

I.3. Les capteurs routiers classiques

I.3.1. Le tuyau pneumatique

C'est le plus ancien des capteurs de trafic routier et on peut considérer qu'il n'est plus utilisé à titre permanent. Malgré ses inconvénients : (bruyant, durée de vie aléatoire, nécessité d'intervention sur chaussée) il est loin d'avoir disparu, surtout pour accéder aux débits tous véhicules ou aux débits classifiés avec une relative bonne précision.

Fixé en travers de la chaussée, il permet de détecter le passage des roues et donc de comptabiliser des essieux. Il conserve encore quelques avantages de simplicité et de faible coût pour des mesures ponctuelles simples pendant quelques semaines. La variation de pression résultant de l'écrasement par les roues se propage jusqu'à l'extrémité où se situe un détecteur (dans le caisson contenant la partie comptage). Ce détecteur pneumatique ou piézo-électrique transforme cette variation de pression en un contact électrique.

On utilise de plus en plus souvent deux tubes distants de un mètre afin de faire de la détection de poids lourd basé sur l'inter-distance entre les deux premiers essieux. *([BJM88]).*



Figure I.2. *Le tuyau pneumatique.*

I.3.2. Les boucles électromagnétiques

C'est aujourd'hui le dispositif de mesure des paramètres de circulation le plus répandu dans de nombreux pays, tant en ville qu'en rase campagne. Si la mesure des débits constitue la principale application, les boucles sont utilisées en ville pour de la détection de passage et pour accéder au temps inter-véhiculaire. Sur voie rapide, en plus du recueil de statistiques, elles sont aussi utilisées pour faire de la détection automatique de bouchons ou d'incidents.

Le capteur est constitué par une boucle inductive, constituée de spires de fil de cuivre isolées de section ≥ 1,5 mm 2 noyée dans le revêtement de la chaussée. Le champ électromagnétique produit par la boucle sera modifié par la présence de la masse métallique d'un véhicule. Ces modifications du champ électromagnétique seront transformées par un détecteur en un signal électrique tout ou rien, représentatif de la présence d'un véhicule. *([BJM88 ,PH90])* .

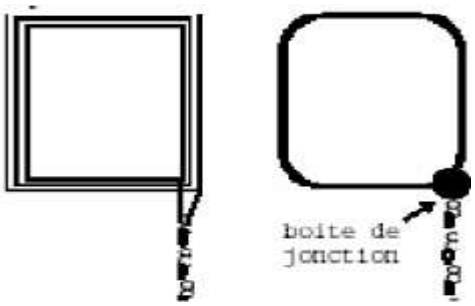


Figure I.3. *La boucle électromagnétique.*

La boucle peut être préfabriquée ou confectionnée sur place et le nombre de spires est généralement compris entre 3 et 5. Pour des mesures temporaires, il est possible d'utiliser des boucles collées sur la chaussée dont la durée de vie est très variable de quelque mois jusqu'à un an. Avec une seule boucle par voie, on mesure bien sûr le débit mais aussi le taux d'occupation **τ**, défini par

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^{n} ti}{T} \qquad (I.1)$$

Où ***ti*** désigne le temps d'occupation de la boucle à la période de mesure **i**, et **T** le temps total de mesure *([PH90]).*

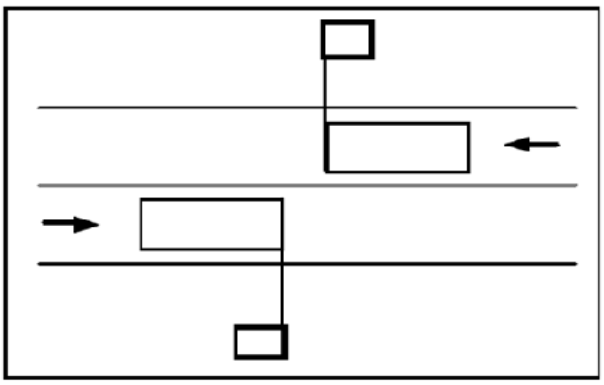


Figure I.4. *Exemple d'implantation de boucles sur une chaussée à 2 voies.*

Le principe de fonctionnement est schématisé par la figure suivante. Lorsque l'avant du véhicule aborde la boucle, le front de montée du créneau se forme. Quand le véhicule parcourt la boucle, le créneau a une amplitude constante. Enfin, le front descendant du créneau se forme lorsque l'arrière du véhicule quitte la boucle. *([BJM88 ,PH90])* .

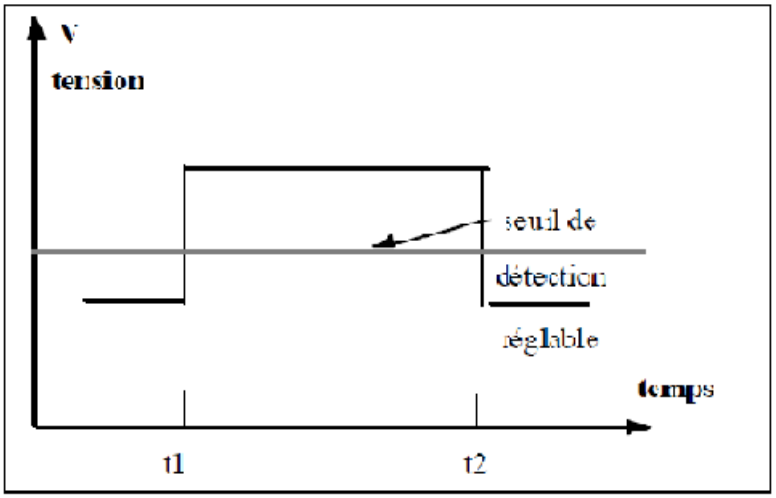


Figure I.5. *Schéma de fonctionnement de boucle électromagnétique.*

Avec 2 boucles par voie, de longueur l et distantes de d, on mesure en plus la vitesse instantanée v des véhicules.

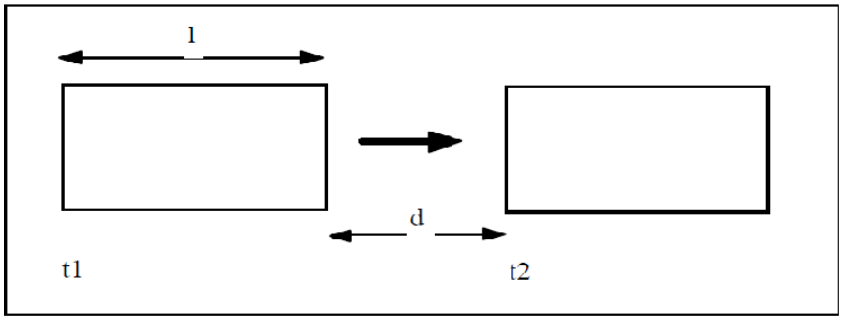


Figure I.6. *Exemple de mesure de vitesse 2 boucles par voie.*

On a en effet $$\mathbf{V=\frac{l+d}{t2-t1}} \qquad (\mathbf{I.2})$$

Où **t1** (resp. **t2**) désigne l'instant d'entrée sur la première (respectivement. seconde) boucle.
La vitesse moyenne d'un flot de n véhicules peut être calculée comme la moyenne harmonique des vitesses instantanées *([PH90]).*
Avec deux boucles électromagnétiques on peut aussi faire du débit classifié par discrimination sur la longueur, après mesure du temps d'occupation et de la vitesse.

Avec l'emploi de capteur à boucle, la chaîne de mesure est comme le montre la figure suivante.

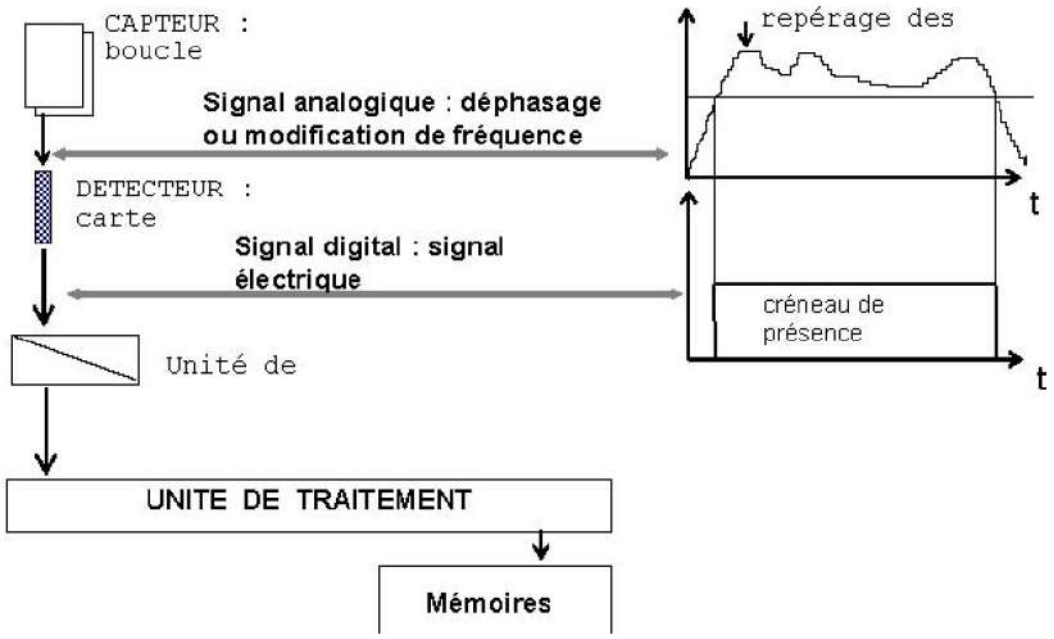


Figure I.7. *La Chaine de mesure.*

- **Un traitement spécifique du signal : *l'analyse de signature.***

Ce traitement se fait avec un détecteur spécifique qui permet de différencier les signaux résultant du passage d'un véhicule léger de ceux résultant du passage d'un poids lourd.

Si certaines conditions de débit, et de vitesses sont respectées le comptage des poids lourds peut se faire avec une relative bonne précision. A l'avenir, il est permis de penser que l'analyse de signature par traitement approprié (réseaux de neurones) pourrait se développer.

- **Une application récente de la boucle : *la détection des essieux.***

Depuis 1994, une nouvelle boucle a fait son apparition sur le marché des capteurs. Elle est étroite, environ 20 cm et sa longueur correspond à la largeur de la voie d'une chaussée. Cette boucle étroite a pour originalité de détecter le passage de chaque essieu de poids lourd. Elle a pour avantage de fournir pour chaque essieu un signal à la sortie analogique du détecteur, dont le sens est opposé à celui fourni par un châssis métallique,*([BJM88 , PH90])* .

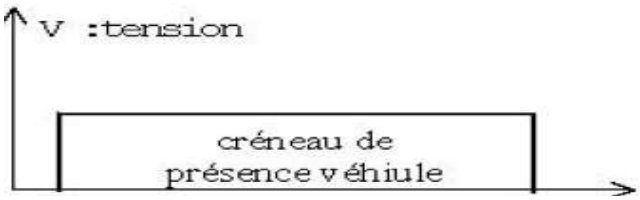


Figure I.8. *La détection des essieux.*

I.3.3. Les capteurs magnétiques

Le principe de fonctionnement est basé sur une analyse de la variation du champ magnétique terrestre causé par le passage des véhicules. À partir du capteur de base la conception de la chaîne de mesure peut être différente d'un constructeur à l'autre. Trois conceptions sont présentées par au moins 4 constructeurs. *([BR05]).*

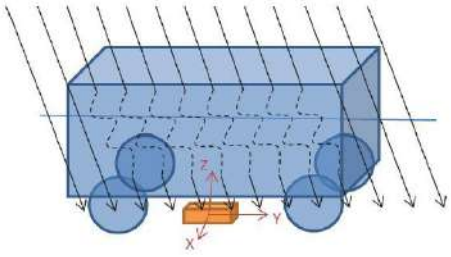


Figure I.9. *variation du champ magnétique par un mobile.*



Figure I.10. *capteur magnétique fixé au milieu de la voie de circulation.*

L'ensemble capteurs, compteur, alimentation est intégré dans une plaque d'aluminium fixée au milieu de la voie de circulation. Une fois installé, l'opérateur ne peut contrôler son bon fonctionnement. Celui-ci ne peut vérifier l'état du fonctionnement qu'à la dépose du compteur. Ces informations peuvent être recueillies soit véhicule par véhicule soit agrégées par séquences de temps (15 classes de vitesses et 8 classes de longueurs). Il présente des précisions sur les mesures de débits tous véhicules comparables à celles des compteurs à tubes. *([PH90])*

Les capteurs avec liaison filaire sont proposés par les constructeurs "LACROIX TECHNOLOGIE" associé à "THORN", "STERELA" et "MAGSYS". Ils se présentent sous la forme d'un parallélépipède de 15 x 30x 40 mm de côtés ou d'un cylindre de Ø 22 mm implanté dans une saignée au milieu de la voie. Ils sont reliés par 2 à 4 fils à un compteur ou une station de mesure de type SIREDO.

Ce capteur est un concurrent direct de la boucle électromagnétique. Il est plus simple et plus rapide à mettre en place. Il présente une économie à l'installation, mais le coût du capteur seul est plus cher. Les précisions offertes par ce produit sont équivalentes à la boucle pour les mesures de débits tous véhicules.

Les vitesses peuvent être calculées par l'utilisation de 2 capteurs associées à une station de mesure. Les précisions sur les mesures de vitesses, comprises entre ± 20%, sont nettement moins bonnes qu'avec un couple de boucles électromagnétiques. Pour les mesures de longueurs les précisions sont comprises entre ± 30%.

Deux constructeurs proposent une liaison "radio" à la place de la liaison filaire, ce sont les constructeurs "STERELA" et "NU-METRICS. Le système proposé par STERELA (LEM **)** est décrit ci-dessous.

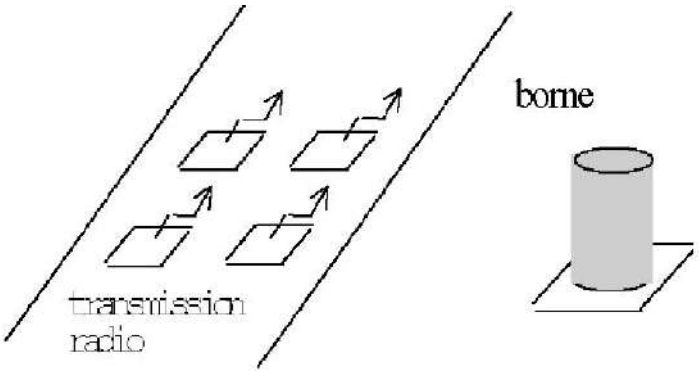


Figure I.11. *Composition de 2 capteurs posés par voie « Système Sterela ».*

Le système Sterela est composé de 2 capteurs posés par voie qui communiquent avec le compteur par une liaison radio dans la bande des 224 Mhz jusqu'à une distance de 20.
Les capteurs magnétiques sont vissés ou collés sur la chaussée sans travaux de génie civil.
Le capteur / détecteur est équipé de batteries haute performances au NiCd rechargeables en 16 heures.

L'élément de mesure ce compose d'un capteur, d'une interface capteur, d'une interface de liaison et d'une alimentation. L'ensemble est inclus dans une plaque étanche de 160x220x20 mm qui se fixe à la chaussée. Le compteur est conditionné dans une borne positionnée au bord de la chaussée, qui peut traiter jusqu'à 4 voies de circulation en débit et 2 voies en vitesse. Cette borne permet la visualisation en temps réel de la détection des véhicules. L'autonomie du système complet est de 15 jours.

Ces capteurs peuvent remplacer les tubes de comptage et l'opérateur peut vérifier le bon fonctionnement du compteur associé aux capteurs. Les précisions offertes par ce produit sont équivalentes à la précision offerte par les compteurs à tube. Le système présente des faiblesses dans son fonctionnement, et probablement encore des défauts de jeunesse

Pour avoir une diffusion plus importante et éventuellement remplacer les boucles électromagnétiques, les capteurs magnétiques devront voir leurs précisions sur les mesures de vitesse et de longueur nettement améliorées. Les développements actuels laissent entrevoir un capteur magnétique au format d'une carte de crédit qui serait collé sur la chaussée, *([PH90]).*

I.3.4. Le capteur à hyper fréquence (RADAR)

Le radar, développé au départ pour des applications militaires, a conquis le domaine routier surtout pour des mesures répressives de vitesses. Largement utilisé il y a quelques années dans les opérations d'exploitation de la route, son importance a diminué au profit de la boucle. De nouveaux radars, compacts, fiables et de faible consommation, sont maintenant très utilisés pour des campagnes de mesures et la détection de véhicules prioritaires. *[BR05]*

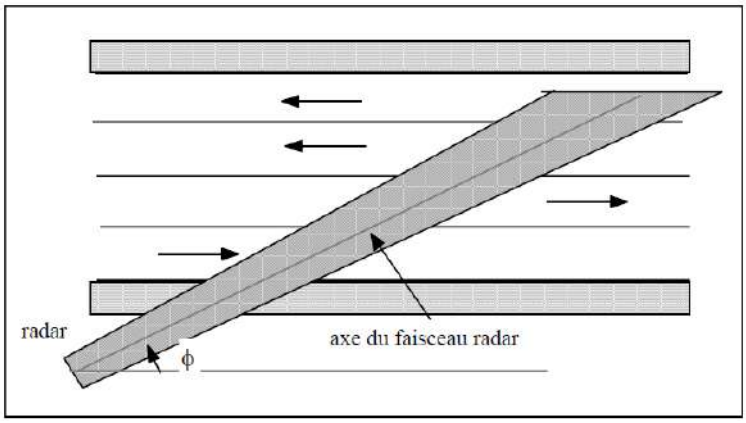


Figure I.12. *La position de capteur a hyper fréquence « RADAR ».*

Le capteur hyperfréquence est le capteur le mieux adapté pour réaliser la mesure des vitesses. Il ne nécessite aucun génie civil. Le radar se positionne sur le bord de la chaussée. Il émet un faisceau de signal d'une fréquence dans la gamme (10 -25 GHz).

Le véhicule traversant le faisceau, réfléchit une partie du signal vers le radar. La différence des fréquences appelée *fréquence Doppler* entre onde émise et onde réfléchie est proportionnelle à la vitesse du véhicule :

$$\mathbf{Fd} = \frac{2V \cos \emptyset}{\lambda} \qquad \mathbf{(1.3)}$$

Fd en Hz, v en m/s, **λ** longueur d'onde d'émission en m, **φ** angle que fait le faisceau émetteur avec le vecteur vitesse du véhicule (en général **φ = 25°** et donc cos **φ = 0**.9063). La fréquence de travail se situe dans la bande des 9 GHz.

En plus de l'inconvénient qui consiste à modifier les comportements, le radar ne permet la mesure des vitesses que sur une seule voie de circulation, sauf s'il est installé au dessus des voies, ce qui permet une zone de couverture correspondant bien à la voie considérée.

I.3.5. Les appareils à visée LASER

Permettant d'accéder aux vitesses individuelles avec une grande précision et à grande distance, ces appareils se présentent soit sous forme de jumelles, soit ressemblant à un caméscope. Ils sont utilisés à la fois pour faire de la répression et pour faire des analyses de comportement. Le rayon laser a l'avantage d'être très fin et permet donc la visée d'un véhicule bien précis sans être obligé d'être au bord de la chaussée. La portée peut atteindre 500m pour les poids lourds et 300m pour les véhicules légers. La vitesse s'affiche directement dans le viseur en 0,36s.

Précis à 1 km/h, ils peuvent aussi mesurer la distance de la cible à 1m prés. Les appareils destinés à un usage non répressifs permettent de mémoriser jusqu'à 500 mesures comprenant la date, le sens, la distance et la vitesse. *([BR05 , PH90])*



Figure I.13. *Le radar MESTA 206*

I.3.6. Le capteur piézo-céramique

Il se présente sous la forme d'un câble blindé coaxial d'un diamètre de 3 mm constitué d'une âme et d'une gaine en cuivre isolées l'une de l'autre par une céramique piézoélectrique. Soumis à des efforts mécaniques, des charges électriques proportionnelles à la force appliquée apparaissent entre l'âme et la gaine.

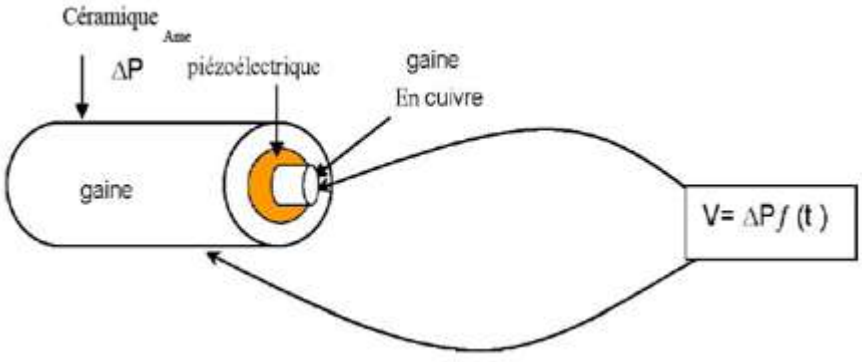


Figure I.14. *principe de capteur piézo-céramique.*

Toutefois, en raison de son coût, son emploi reste circonscrit à des applications spécifiques nécessitant la connaissance des charges roulantes,*([BR05]).*

Le capteur nu n'est pas installé directement dans la chaussée car il ne doit jamais être déformé, sous peine de perdre sa précision. Il est donc conditionné dans un barreau de résine afin de lui assurer une résistance mécanique.

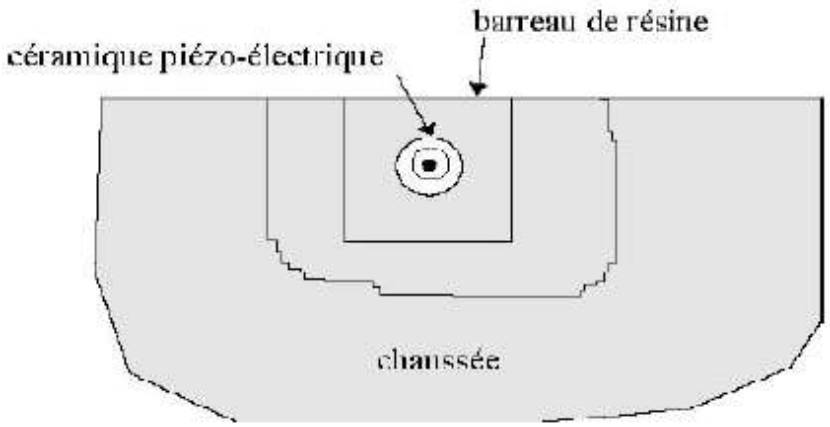


Figure I.15. *Installation de capteur piézo-céramique.*

L'utilisation du câble piézoélectrique à des fins de pesage ou de classification du trafic nécessite des opérations d'étalonnage, avant enrobage et après pose, pose qui demande des précautions particulières. Le choix du site a une grande importance à la fois pour la longévité du capteur et pour la précision des mesures.
Selon les résultats de l'étalonnage, le capteur est déclaré bon pour le pesage, ou seulement bon pour faire du classement en silhouette. *([BR05])*

Tableau I.1. *Les résultats de l'étalonnage des capteurs.*

Catégorie D'essieu	Classes d'exactitude				
	A	**B**	**C**	**D**	**E**
Essieu simple	≤ 8%	≤ 15%	≤ 20%	≤ 30%	>30%
Essieu d'un groupe	≤ 10%	≤ 20%	≤ 25%	≤ 35%	>35%
Groupe d'essieux	≤ 7%	≤ 13%	≤ 18%	≤2 8%	>28%
poids total roulant	≤ 5%	≤ 10%	≤ 15%	≤ 25%	>25%

Pour conserver la pérennité des performances, un étalonnage régulier est nécessaire. En fait, pour des mesures de longue durée, il est préférable d'utiliser la technique d'auto-étalonnage, basée sur la stabilité des poids de certains essieux de certains poids lourds.

Associé à d'autres capteurs, principalement des boucles électromagnétiques, il permet le calcul du poids de chaque essieu, du poids total, le calcul des distances inter-essieux et le classement des véhicules selon leur silhouette, *([BR05]).*

Pour des utilisations spécifiques ce capteur piézoélectrique a été décliné selon d'autres diamètres :

- ✓ **8 mm** qui peut être installé directement dans la chaussée (sans enrobage préalable). Il est plus rigide et plus résistant que le 3mm et ne peut être courbé.

- ✓ **1 mm** qui peut être installé sur la surface de la route. Il est destiné à la classification des véhicules et accepte un rayon de courbure minimal de 10cm.

I.3.7. Les capteurs vidéo

Couramment utilisée pour la surveillance du trafic dans des postes de contrôle, l'image vidéo offre des informations d'une grande richesse que seul un opérateur peut appréhender dans leur globalité grâce à une présence permanente face aux moniteurs.

Pour s'affranchir de cette contrainte, des systèmes d'analyse d'image en temps réel ont été développés pour délivrer une alarme en cas de situation jugée anormale ou peu élaborer des mesures classiques de trafic : débits, vitesses, taux d'occupation, longueur de file d'attente...

Les principales utilisations de l'analyse d'image vidéo sont la détection automatique de bouchon (DAB) et à la détection automatique d'incidents (DAI). Les développements de traitement d'image ont également porté sur la mesure des paramètres du trafic tels que débit, vitesse, taux d'occupation de boucle fictive, longueur de queue. La précision des mesures vidéo est inférieure à celle des mesures par boucles magnétiques pour certains paramètres,*([BR05]).*



Figure I.16. *Les capteurs vidéo.*

L'intérêt d'un nouveau capteur basé sur des techniques de traitement d'images se justifie de multiples façons : facilités d'installation, de maintenance, accès à des variables spatiales du trafic, surveillance de vastes étendues, contrôle visuel possible, utilisation d'une technologie moderne. Tous les domaines de la gestion du trafic sont a priori visés : la mesure à des fins de connaissance statistique du trafic, la surveillance (la détection d'incidents) et la régulation de la circulation.

L'analyse d'images de trafic pose sur le plan méthodologique, de nombreuses difficultés : variabilité des ambiances lumineuses, variabilité des formes des objets recherchés, masse énorme d'information à traiter, contrainte de coût des dispositifs finaux.
Il faut enfin signaler que le traitement d'image permet également de détecter la présence de fumée, ce qui s'avère particulièrement intéressant dans les tunnels, même si, le véhicule en feu s'arrêtant dans un grand nombre de cas, la détection d'arrêt pourra s'être déclenchée auparavant,*([BR05 ,TMYW88]).*

Généralement, la caméra est implantée en hauteur sur un mât ou un support intégré au site comme par exemple un ouvrage d'art. Pour permettre des traitements d'image, le champ d'observation doit être fixe, ce qui impose des caméras également fixes sans effet de zoom.
Les analyseurs d'images destinés à la mesure des paramètres du trafic offrent une précision < 3 % si le site observé dispose d'un marquage spécifique. Dans le cas contraire, la précision est < 10 %.

La mise en œuvre d'un capteur vidéo associé à une analyse d'images est plus particulièrement destinée à la surveillance de voiries présentant des contraintes d'exploitation importantes telles que les autoroutes urbaines ou les tunnels,*([BR05 ,TMYW88]).*

I.4. Utilisation de la photographie aérienne

La photographie aérienne constitue une technique d'observation précise des mouvements instantanés des véhicules. La technique permet d'étudier une zone d'une superficie moyenne de 2.5 km2, à partir de clichés réalisés grâce à une chambre photo grammétrique grand angulaire, de grand format et de haute définition. L'échelle des prises de vue est du 1/9000 environ. On détermine ainsi le point de départ du véhicule, son itinéraire, sa destination, son temps de parcours. *([TMYW88])*

Les variables macroscopiques - concentration, vitesse moyenne et débit - peuvent être calculées sur chaque tronçon. D'autres paramètres intéressants peuvent aussi être appréhendés : les retards aux carrefours, les longueurs de file d'attente, les proportions de mouvements tournants ... Les difficultés liées :

- au dépouillement
- à la durée limitée des missions aériennes (une 1/2 h environ)
- aux conditions météorologiques
- et surtout un coût économique élevé

I.5. Nouveaux capteurs à diffusion plus restreinte ou en développement

I.5.1. Les capteurs à ultrasons

Le capteur acoustique est constitué par une antenne directive qui émet des trains d'ondes ultrasonores à environ 50 kHz. En l'absence de tout obstacle, l'aire de détection correspond à un disque dont le diamètre dépend de la direction et de la hauteur de l'antenne. Lors du passage d'un véhicule, une fraction de cette onde réfléchie par le mobile est captée par le récepteur au bout d'un certain temps dépendant de la vitesse de propagation des ondes dans l'air. Avec l'exploitation de ce principe Le détecteur délivre un signal destiné au comptage des véhicules et permet le calcul du taux d'occupation, *([TMYW88]).* La mesure du temps séparant l'émission du retour permet d'accéder à la mesure de la distance séparant l'émetteur-récepteur à ultrasons du mobile. *([CS93 , TMYW88])*

Le mode de visée peut être soit horizontal, soit vertical. En visée horizontale, il permet de mesurer la distance entre le bord latéral du véhicule et l'ultrason. Cela permet de conduire

des analyses relatives au positionnement des véhicules selon différentes configurations de tracé, d'équipement de la route, ou de marquage. Sur un portique au-dessus et dans l'axe de la voie de circulation cette implantation permet la mesure des hauteurs de véhicules et de classifier le trafic. Le capteur à ultrasons peut aussi faire des mesures des débits tous véhicules et de discriminer les poids lourds.*([CS93]).*

Ce type de capteur est utilisé massivement au Japon, le plus souvent sur autoroute en raison des facilités de leur maintenance et de l'absence de génie civil sur la chaussée. On n'en rencontre pas en Europe installés de façon permanente, et ils sont seulement utilisés pour réaliser des mesures de nature temporaires: stations mobiles de mesures de débits ou poste de mesure de gabarit,*([CS93 ,TMYW88]).*

I.5.2. Utilisation de la fibre optique

Des recherches récentes ont montré que la fibre optique peut dans certaines conditions être utilisée comme capteur de trafic et plus particulièrement pour le pesage en marche.
Le principe est basé sur la biréfringence induite dans le cœur de la fibre optique sous l'effet d'une charge. La propagation lumineuse se fait selon deux modes de polarisation indépendants dont le premier est associé à la direction de la force. Lorsque la fibre est soumise à une sollicitation mécanique, le déphasage introduit est proportionnel à la force. Insérée entre deux lames métalliques, la fibre est connectée à une tête optoélectronique qui fournit une lumière polarisée rectiligne. Les variations d'intensité lumineuse, fonction de la charge appliquée, sont converties en signal électrique où la rotation de phase du champ électrique traduit des franges polarimétriques. *([CS93 , TMYW88])*



Figure I.17. *Franges d'interférences.*

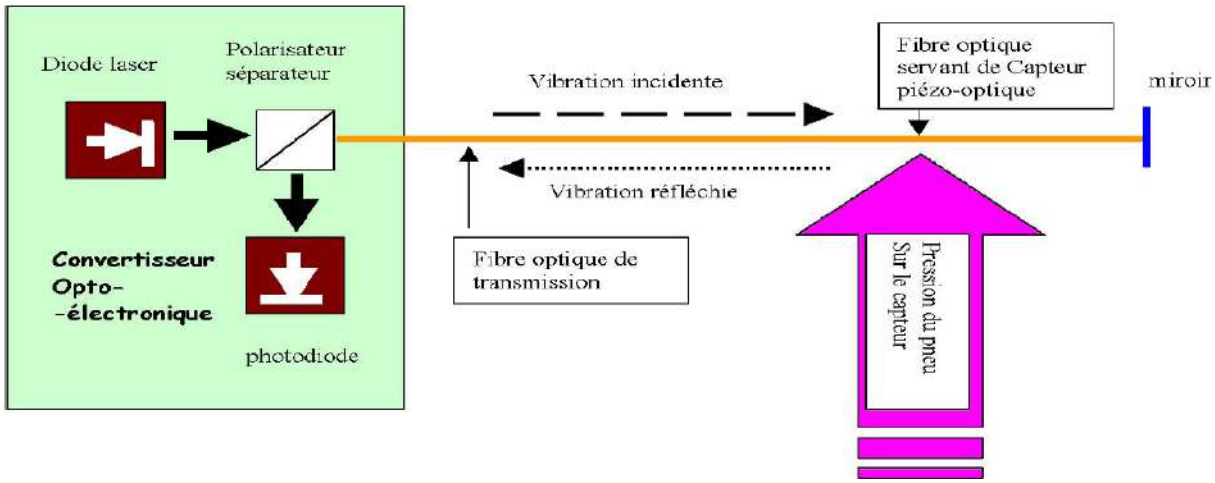


Figure I.18. *Synoptique du capteur à fibre optique*

Le système de pesage se compose de deux capteurs par voie, distants de 3m et inclinés de 70° par rapport à la direction du trafic. La source optique peut être déportée jusqu'à une distance de 2km.

Ce nouveau capteur fonctionne à basse vitesse et présente des caractéristiques intéressantes comme une indépendance à la température et une insensibilité électromagnétique. Ce capteur encore expérimental a déjà démontré sa tenue dans le temps**.**

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, après une brève définition du trafic routier, nous avons exposé un panorama sur différentes méthodes de mesure des variables de trafic routier. Nous avons cités des capteurs classiques et d'autres plus récent.

Nous essayerons dans le chapitre suivant, de présenter le problème de contrôle du trafic routier par un réseau de capteur sans fil.

CHAPITRE II : CONTROLE DU TRAFIC ROUTIER PAR UN RESEAU DE CAPTEUR SANS FIL (WSN)

II.1. Introduction

De nos jours, se déplacer est devenu un aspect essentiel de la vie quotidienne : qu'il s'agisse de transports en commun ou de véhicules personnels, le vaste réseau formé de ces moyens de locomotion est immensément complexe à gérer. Sa gestion recouvre l'ensemble des techniques humaines et automatisées permettant d'assurer la surveillance des transports, au mieux un gain de performance dans l'acheminement des différents flux.

II.2. Les systèmes de transport intelligent

II.2.1. Présentation

Le trafic routier urbain s'est amplifié en l'espace de quelques années, augmentant ainsi les problèmes engendrés qui sont nombreux et qui coûtent quotidiennement temps, argent, santé et qualité environnementale : embouteillages, accidents, pollution ou encore infractions. Pour l'exemple, une étude menée par IBM en juin 2011 **([SM011])** montre un passage de 8% (2010) à 28% (2011) de New-Yorkais ayant indiqué que les transports auraient grandement nuit à leur travail ou études. De même, à Moscou, par exemple, les conducteurs sont soumis à embouteillages quotidiens de deux heures et demie en moyenne. Un handicap important qu'il devient de plus en plus nécessaire d'administrer.

La gestion du trafic routier s'inscrit dans le domaine des STI, qui visent à proposer des outils et modèles afin de gérer les aléas de ce dernier, ceci par le biais ou non d'équipements réactifs dits dynamiques. L'application de tels systèmes va avoir de multiples objectifs, parmi lesquels la fluidification du trafic, la détection d'incidents, la surveillance temps-réel du trafic, la diffusion d'informations ou de consignes variables aux automobilistes ou encore la réduction en conséquence de la pollution et des bruits.

II.2.2. Etendue

En ville, les STI s'étendent à de nombreuses applications. En premier lieu, ces derniers sont majoritairement conçus pour fluidifier et gérer le trafic routier, notamment au niveau des intersections où ces derniers peuvent directement agir sur les feux de circulation, également

au niveau de la politique de stationnement, de l'information de l'utilisateur à tout niveau, et de l'utilisation de stratégies particulières afin de gérer les situations de danger. En second lieu, ces systèmes vont agir de manière plus ou moins directe sur des enjeux modernes tels que la pollution, en réduisant l'émission de gaz à effet de serre (conséquence d'une régulation cohérente du trafic). L'étendue des STI est immense, et se divise globalement en deux catégories dans la littérature : d'une part, ceux dont la contribution fait pleinement partie du domaine, et d'autre part, ceux qui y contribuent sans pour autant y faire référence : modèles purement théoriques, systèmes multi-agents, publications tantôt basées sur l'aspect matériel d'une technologie, tantôt sur les communications existantes.

II.2.3 Contexte et application

II.2.3.1 Les centres d'ingénierie et de gestion du trafic

Les réseaux routiers urbains sont gérés par des centres d'ingénierie et de gestion du trafic. Le rôle de tels organismes, généralement attachés à une zone géographique bien particulière, est de coordonner au mieux les différents éléments routiers, et de faire face aux situations de la vie de tous les jours (travaux, accidents, gestion du trafic routier et des pics, etc.).

II.2.3.2 Intersection [CL90 ,WY02 ,SC04]

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

La *Figure II.1* montre le modèle de carrefour qui est typiquement utilisé dans la littérature afin de valider un modèle : une intersection composée de quatre directions avec un nombre fixé de voies pour chacune. Ici, les voies pour tourner à gauche sont séparées des voies allant tout droit ou à droite, ces deux derniers mouvements étant confondus. Ce modèle possède l'avantage de pouvoir être adaptable à de nombreuses situations, mais est instinctivement limité de part la distinction des mouvements et voies.

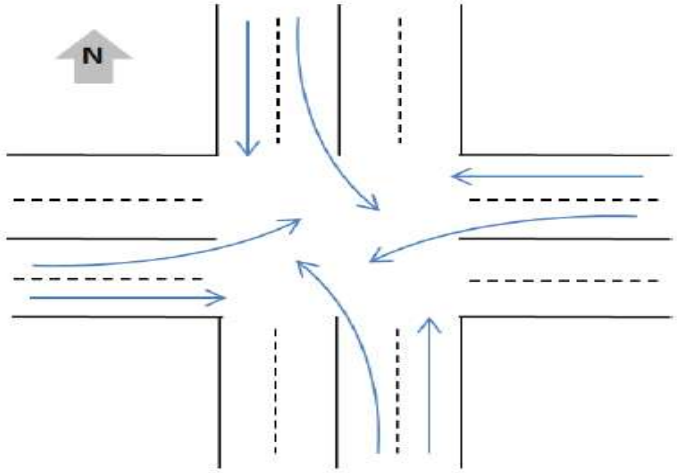


Figure II.1. *Modèle de carrefour généralement utilisé dans la littérature.*

II.2.3.3 Les voies spéciales [NHM04, NHS07, AKS010]

Outre les intersections, les travaux insistent également sur la gestion des voies spéciales, où les transports en commun, taxi et pistes cyclables peuvent jouer un rôle important.
La gestion des voies de bus est vue sous de multiples aspects, et la notion de détecteur est souvent symbolisée par des capteurs sans fil, souples et dynamiques vis-à-vis des tâches à gérer.

II.2.3.4 Le stationnement [VRT010]

La gestion du stationnement est également primordiale et a une incidence directe sur la fluidité du trafic : il parait logique de dire que l'utilisation de la voiture en milieu urbain repose en partie sur le fait de savoir si oui ou non une place est disponible sur le lieu d'arrivée.
Les STI vont aider à prendre des décisions, mais également informer les utilisateurs ou encore contrôler les véhicules.

a) Exemple, des détecteurs peuvent être utilisés afin de détecter la présence d'un véhicule sur une place, et calculer sa durée de stationnement. Ceci a été constaté dans la ville d'Amiens via des stationnements "minute" : une borne est associée à une place, et dès lors qu'un véhicule s'y gare, un compte à rebours se déclenche pour une durée déterminée. Si cette durée est dépassée, les agents de la voie publique sont automatiquement prévenus.

b) Nous pouvons également citer l'utilisation de panneaux à messages variables (PMV) pour les parkings, systèmes très répandus dans les grandes métropoles qui indiquent le

nombre de places disponibles (ceci n'utilisant pas nécessairement des détecteurs , mais étant généralement calculé en fonction des entrées / sorties dans le parking en lui-même).

II.2.3.5 La sécurité [TEOV]

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

II.2.3.6 Les ronds_points [BLW011, PSCS09, XZHZ09]

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

II.2.3.7 Rapport à la pollution

Concernant la pollution, les STI peuvent grandement aider à réduire l'énergie et l'émission des gaz à effet de serre provoquée par les véhicules, ceci au travers de plusieurs points.
Tout d'abord, la connaissance apportée par les STI peut influencer l'usager à prendre les transports en commun, moins consommateurs et qui ont tendance à aller vers l'écologie (un bus émet 0.03 kg de CO2 par passager-kilomètre, une voiture 0.11 *([OMT06]))*.

II.2.4 Vers une approche dynamique

II.2.4.1 Présentation

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 connaitre des informations sur ce qu'il se déroule à des endroits bien précis, et prendre des décisions en conséquence. Dans cette partie, nous allons étudier les particularités de tels systèmes, en présentant tout d'abord les particularités logicielles et matérielles de ceux se basant uniquement sur les données issues

de l'infrastructure (détecteurs), puis en présentant plus vaguement des systèmes dits coopératifs, où des communications inter-véhiculaires vont être introduites. Nous finirons en décrivant des modèles théoriques souvent difficiles à appliquer en situation réelle. La gestion du trafic en milieu urbain opérant essentiellement au niveau des carrefours, c'est cet axe que nous allons continuer de développer.

II.2.4.2 Les systèmes de gestion classiques des feux de circulation

La gestion des feux de circulation est un problème qui a commencé à être étudié au début des années 1970 *([MHNY06])* avec l'apparition progressive de systèmes de gestion centralisés, en charge des carrefours d'une zone géographique donnée. Au fil des années, ces systèmes se sont diversifiés, et ont connu trois générations de contrôle. 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 :

Première génération : contrôle à temps fixe : en fonction de l'heure et parfois du jour, le système va utiliser un plan de feux prédéfini. Exemple : une configuration stricte est appliquée de 12h30 à 14h, tandis qu'une plus souple et équitable pour l'ensemble des voies d'un carrefour est appliquée à 3h du matin. Classiquement, trois configurations existent : matin, après-midi, et "reste" *([PEFL]).* Nous pouvons imaginer quelque chose de plus complet prenant en compte des plans spécifiques aux heures de pointe.

Deuxième génération - contrôle à temps dynamique : des détecteurs sont utilisés afin de recueillir les données du trafic toutes les X minutes. Ces données peuvent être utilisées afin d'optimiser ou mettre en place un plan de feu. Par exemple, une fois les phases déterminées, l'un des enjeux va être de définir un temps de feu vert pour chacune d'entre elles : ce dernier est généralement constitué d'une valeur minimale et maximale, afin de ne pas provoquer des arrêts intempestifs ou d'engendrer un cycle trop long. Le feu vert minimum suffit uniquement si pendant son temps d'exécution, aucun nouveau véhicule ne franchit un détecteur. Si un nouveau véhicule passe, un temps est ajouté pour ce véhicule, l'opération répétée éventuellement jusqu'au feu vert maximum.

Troisième génération - contrôle à 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 traffic control software).
- **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. L'opération va être effectuée de manière adaptative, c'est à dire en quasi-temps réel. L'avantage de cette méthode est qu'elle peut s'adapter à de multiples situations, mais reste la plus compliquée à mettre en place (nécessité de cerner les informations à utiliser, comment les utiliser et se baser sur des théories parfois lourdes).

Nous allons essentiellement parler de deux systèmes qui représentent les deux principaux systèmes de gestion du trafic routier utilisés dans le monde :

➢ **Scoot :** Citons d'abord SCOOT *([DRRB91]),* Split Cycle Offset Optimization Technique), un système de contrôle à la fois réactif et adaptatif et entièrement centralisé, développé par le TRL (Trafic research laboratory, un centre de recherche anglais sur les transports). Dans ce système, l'ensemble des informations recueillies sur le terrain vont à un centre de gestion, qui s'occupe de traiter les informations et renvoyer des indications directement aux intersections. Les véhicules sont détectés par des dispositifs pouvant être placés à divers endroits sur les voies : au niveau des feux ou à une certaine distance afin de pouvoir mesurer le débit du trafic. SCOOT mesure en permanence le volume de véhicules de chaque côté de l'intersection et change la durée des phases en fonction d'un indice de performance, calculé par rapport au délai d'attente moyen, de la longueur des queues et des arrêts sur le réseau. Ainsi, de la même manière que TRANSYT *([BMCJ87]),* système sur lequel il est basé, SCOOT génère des plans de feux en fonction de la demande des utilisateurs (côté adaptatif). En plus de cela, le système utilise des informations en ligne issues de bases

de données (historique ou autres, côté réactif). Notons au passage que SCOOT est l'un des principaux systèmes de contrôle adaptatif déployé mondialement.

- **Scats :** Citons ensuite SCATS *([ASKD80])*, Sydney Coordinated Adaptive Traffic System) qui a été à l'origine développé pour Sydney et d'autres villes Australiennes. Il est pour sa part entièrement adaptatif et utilise une notion de hiérarchie (ce qui forme une certaine distribution sur le réseau) : entre le recueil des données sur le terrain et le centre de contrôle, des contrôleurs intermédiaires sont insérés, permettant d'alléger la charge globale du système et d'avoir un contrôle découpé en plusieurs zones, l'ensemble des acteurs utilisant des communications synchronisées. De manière similaire à SCOOT, ce système ajuste le temps des cycles et autres paramètres en fonction des données recueillies afin de diminuer le délai et les arrêts, mais n'utilise pas la même stratégie : les valeurs recueillies permettent la sélection de plans de feux parmi une large librairie, sur lesquels le système va se baser pour proposer des plans adaptés. De plus, contrairement à SCOOT, les détecteurs sont uniquement placés au niveau des feux de circulation. Notons que les conventions utilisées par SCATS sont éloignés des standards NEMA, ce qui ne facilite pas son intégration sur les réseaux urbains *([MHNY06]).*

II.2.4.3 Étude matérielle [LAK07]

Afin d'aller vers une approche dynamique, notamment au niveau des intersections, les logiciels et centres de contrôle ont besoin d'informations en provenance du terrain et recueillies à l'aide de détecteurs. Dans cette section, nous allons décrivons brièvement les deux familles existantes.

- **Les systèmes intrusifs :** Ces derniers nécessitent une installation souvent handicapante pour les usagers car situés généralement sur la chaussée. Les exemples les plus utilisés en pratique sont les boucles électromagnétiques, constituées de plusieurs spires de cuivre directement enfouies dans la chaussée : ces dernières permettent de mesurer les variations d'inductance lorsqu'un véhicule passe dessus. En clair, ce genre de dispositif va permettre de détecter des véhicules, de les classifier en fonction de l'importance des variations, et même effectuer des mesures de vitesse (sous réserve d'avoir deux boucles séparées d'une distance connue). Après plusieurs comparatifs réalisés**,** il s'avère que l'installation de ces boucles coûterait en moyenne de 500 à 800$ à l'unité. Outre ces systèmes, nous pouvons citer les tubes magnétiques ou encore les réseaux de capteurs

électromagnétiques sans fil, qui font l'objet de ce document et que nous détaillons dans la prochaine partie.

- **Les systèmes non-intrusifs :** Ces derniers sont souvent volumineux et leur efficacité va dépendre des conditions environnementales, avec une installation généralement située sur le côté de la chaussée. Les matériels les plus fréquents sont les radars, posés en bord de route et pouvant être de plusieurs types : lasers, à ondes ultrasoniques, micro-ondes ou encore acoustiques. Des solutions tout aussi courantes sont les dispositifs de traitement d'images, filmant directement la circulation. Le traitement peut ainsi être automatique ou manuel (exemple : supervision humaine dans les centres de gestion). Le prix de départ d'équipements fonctionnant par traitement d'images serait fixé à 5.000$, et pourrait s'envoler jusqu'à 26.000$ l'unité.

En dépit de la diversité apparente des solutions régissant le trafic routier depuis plusieurs années, la liste des inconvénients reste longue : prix de mise en place et de maintenance, durée d'installation, nécessité de câblage, solutions centralisées dans un centre de gestion. Les réseaux de capteurs sans fil, que nous aborderont dans ce chapitre, constituent une excellente solution à ces problèmes couramment rencontrés.

II.2.5 Vers une approche décentralisée

Comme étudié, les réseaux routiers urbains sont gérés par des centres de contrôle. Le rôle de tels organismes, généralement attachés à une zone géographique bien particulière, est de coordonner au mieux les différents éléments routiers, et de faire face aux situations de la vie de tous les jours (travaux, accidents, gestion du trafic routier et des pics, etc.). Ces centres permettent la manœuvre d'un ensemble de technologies placées sur le terrain. En particulier les dispositifs de supervision et autres outils type SCAT ou SCOOT. Face à des systèmes centralisés de ce type, l'adoption progressive de systèmes distribués va représenter un énorme gain. D'une manière générale, nous pouvons dire que les systèmes distribués représentent les avantages suivants :

- ✓ **Coût :** plusieurs processeurs (détecteurs) à petits prix au lieu d'une grosse unité de calcul, si ce n'est d'avantage.
- ✓ **Performances de calcul :** les moyens centralisés sont généralement moins efficaces qu'une approche décentralisée, ou alors à très fort coût. De plus, le calcul parallèle devient naturel.

- ✓ **Sécurité :** une panne ou faute matérielle ou logicielle sur un système centralisé peut être fatale à ce système.
- ✓ **Évolution :** facilitée par l'auto-organisation naturelle d'un système distribué.

Dans le cas plus spécifique des STI, nous pouvons citer (*[MYH07])* qui indique que les approches centralisées ne peuvent pas faire face à la complexité croissante des réseaux de circulation urbains. En particulier, l'utilisation d'un réseau décentralisé permet d'améliorer la gestion de la circulation localisé sur une zone bien précise (exemple : intersection), et permet également gestion plus souple de la communication entre éléments voisins.

Remarquons que dans l'immédiat, un centre de contrôle global existera toujours, la machine n'étant pas capable de se passer totalement de l'homme. L'application de technologies distribuées peut néanmoins amener ce centre de contrôle à recueillir moins de câblage, moins de ressources en termes de calcul, moins de moyens.

Dans cette première partie, nous avons étudié ce qui se faisait traditionnellement dans les STI, et avons cerné plusieurs points intéressants : la nécessité de réactivité et de dynamisme, de distribution, ou encore l'intérêt croissant des équipements à faible coût. Dans la partie suivante, notre étude va se recentrer sur notre intérêt principal : l'application de réseaux fixes de capteurs sans fil aux STI, qui apparaissent comme étant une solution idéale à ce genre d'applications. Nous verrons alors quelques approches se reposant sur une technologie distribuée et en plein essor.

II.3 Les réseaux de capteurs sans fil

Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à une miniaturisation du matériel informatique. Cette tendance à la miniaturisation a apporté une nouvelle génération de réseaux informatiques et télécoms présentant des défis importants. Les réseaux de capteurs sans fil sont l'une des technologies visant à résoudre les problèmes de cette nouvelle ère de l'informatique embarquée.

Un Réseau de Capteurs Sans Fil (RCSF) -Wireless Sensors Network (WSN) est un ensemble de dispositifs très petits, nommés nœuds capteurs, variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers. Dans ces réseaux, chaque nœud est capable de surveiller, d'une manière continue, son environnement et de réagir en cas de besoin en envoyant l'information collectée à un ou plusieurs points de collecte afin d'accomplir des tâches de captage complexes. Les nœuds capteurs ne sont pas intégrés à une quelconque architecture de communication

préexistante, mais ils communiquent à l'aide d'un réseau Ad Hoc sans fil, ces derniers sont soit placés à un endroit précis ou bien dispersés aléatoirement (généralement déployés par voie aérienne à l'aide d'avion ou d'hélicoptère) *[SNB08, RAH09, LNA04]*.

II.3.1 Technologies des capteurs

Les nœuds capteurs se déclinent en une multitude de modèles en relation avec l'application à laquelle ils sont destinés. Parmi les modèles les plus courants, on trouve les capteurs MICA développés par l'université de Berkeley et commercialisés par Crossbow, les capteurs Imote commercialisés par Crossbow ainsi que les capteurs TinyNode développés, pour des applications réelles liées à l'industrie, par Shockfish SA.

II.3.2 Architecture d'un capteur sans fil

Un capteur sans fil est un petit dispositif électronique capable de mesurer une valeur physique environnementale (température, lumière, pression, etc.) et de la communiquer à un centre de contrôle via une station de base. Les progrès conjoints de la microélectronique, des technologies de transmission sans fil et des applications logicielles ont permis de produire à coût raisonnable des micro-capteurs de quelques millimètres cubes de volume, susceptibles de fonctionner en réseaux .Un capteur est composé de quatre unités de base *(Figure I.3)*:

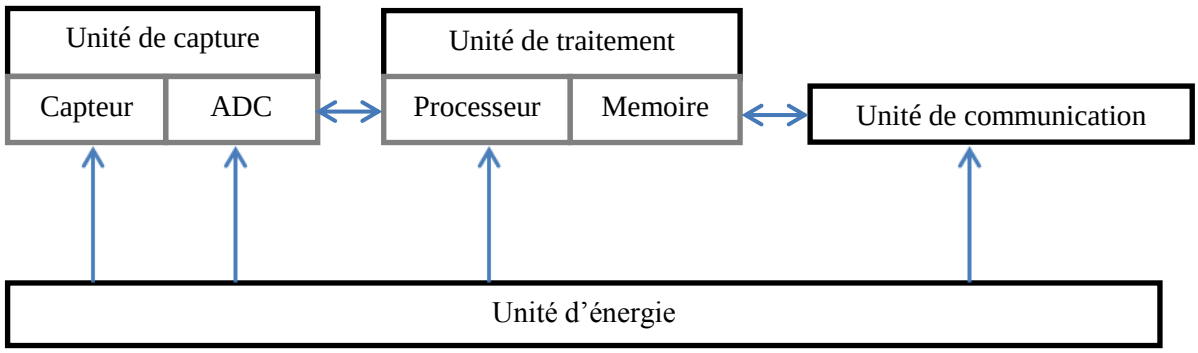


Figure II.2. *Les composants d'un nœud capteur [ASC02, SNB08].*

Unité de capture (Sensing unit) : elle est composée de deux sous-unités, un dispositif de capture physique qui prélève l'information de l'environnement local et un convertisseur analogique/numérique appelé ADC (Analog to Digital Converters).

Unité de traitement (Processing unit) : les données captées sont communiquées au processeur où elles sont stockées dans la mémoire.

Unité de communication (Transceiver unit) : elle est composée d'un émetteur/récepteur (module radio) permettant la communication entre les différents nœuds du réseau.

Unité d'énergie (Power unit) : c'est la batterie qui, n'est généralement ni rechargeable ni remplaçable. La capacité d'énergie limitée au niveau des capteurs représente la contrainte principale lors de conception de protocoles pour les RCSF. Les unités d'énergie peuvent être supportées par des photopiles qui permettent de convertir l'énergie lumineuse en courant électrique ***([SNB08]).***

II.3.3 Architecture d'un réseau de capteurs sans fil

Un réseau de capteur sans fil (RCSF) consiste en un ensemble de nœuds capteurs variant de quelques dizaines d'éléments à plusieurs milliers, placés de manière plus ou moins aléatoire (par exemple par largage depuis un hélicoptère), dans une zone géographique appelée zone de captage, ou zone d'intérêt, afin de surveiller un phénomène physique et de récolter leurs données d'une manière autonome.

Les nœuds capteurs utilisent une communication sans fil pour acheminer les données captées vers un nœud collecteur appelé nœud puits (sink en anglais), ou station de base (base station). Le puits transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central << Gestionnaire de taches >> pour analyser ces données et prendre des décisions. Ainsi, l'utilisateur peut adresser des requêtes aux autres nœuds du réseau, précisant le type de données requises, puis récolter les données environnementales captées par le biais du nœud puits ***([YAC12]).***

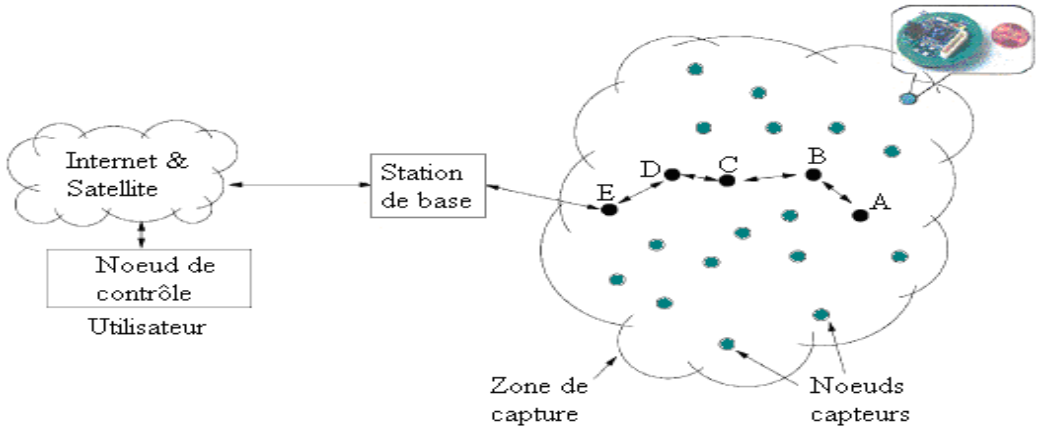


Figure II.3. *Architecture de communication d'un RCSF [ASC02].*

II.3.4 Pile protocolaire dans les réseaux de capteurs

Dans le but d'un établissement efficace d'un RCSF, une architecture en couches est adoptée afin d'améliorer la puissance du réseau. Une pile protocolaire comprend cinq couches et trois plans. Citons la couche application, la couche transport, la couche réseau, la couche liaison de données et la couche physique, nous avons aussi le plan de gestion de l'énergie, le plan de gestion de la mobilité et le plan de gestion des tâches.

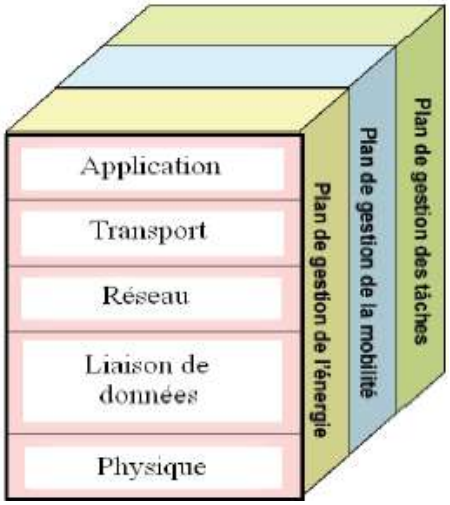


Figure II.4. *Pile protocolaire [SNB08].*

Les plans de gestion d'énergie, de mobilité et de tâches sont responsables du contrôle de l'énergie consommée, des mouvements des nœuds et de la distribution des tâches à travers toute la pile protocolaire, ces niveaux permettent aux capteurs de coordonner leurs tâches et minimiser la consommation d'énergie *[SNB08, LNA04]*.

II.3.4.1 Le plan de gestion d'énergie

Un capteur peut par exemple éteindre son interface de réception dès qu'il reçoit un message d'un nœud voisin afin d'éviter la réception des messages dupliqués. De plus, quand un nœud possède un niveau d'énergie faible, il peut diffuser un message aux autres capteurs pour ne pas participer aux tâches de routage, et conserver l'énergie restante aux fonctionnalités de captage.

II.3.4.2 Le plan de gestion de mobilité

Ce niveau détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, d'une manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur final, et maintenir une image

récente sur les nœuds voisins, cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

II.3.4.3 Le plan de gestion des tâches

Le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie, et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

II.3.5 Les couches de la Pile protocolaire [SAM10]

II.3.5.1 Couche application

Il s'agit de la couche la plus proche des utilisateurs, gérée directement par les logiciels. Parmi les protocoles d'application, nous citons : Sensor management Protocol (SMP), Task assignement and data advertisement protocol (TADAP), Sensor query and data dessiminitation protocol(SQDDP). Ces protocoles sont nécessaires pour tout réseau de capteurs basé sur le schéma de la pile protocolaires décrit précédemment.

II.3.5.2 Couche transport

La couche transport contribue au maintien du flux de données si l'application du réseau de capteurs l'exige. Les protocoles de la couche transport sont particulièrement nécessaires si le réseau de capteurs est prévu d'être accessible à partir d'autres réseaux externes tels que l'Internet. Le protocole TCP avec son mécanisme de transmission actuel n'est pas compatible avec les caractéristiques des environnements des réseaux de capteurs, une approche nommée «TCP spliting» peut être nécessaire pour habiliter le réseau de capteurs d'interagir avec les réseaux externes. Dans cette approche, les connections TCP se terminent au niveau des nœuds puits, dès lors, des protocoles spéciaux au niveau de la couche transport seront utilisés pour assurer la communication entre le nœud puits et les nœuds capteurs. Ainsi, la communication entre les utilisateurs et le nœud puits sera via les protocoles TCP ou UDP, par Internet ou par satellite. D'autre part, la communication entre le nœud puits et les nœuds capteurs peut être purement via le protocole UDP, à cause des limitations de mémoire connues dans les nœuds capteurs.

II.3.5.3 Couche réseau

Elle s'occupe du routage de données fournies par la couche transport. Elle établit les routes entre les nœuds capteurs et le nœud puits et sélectionne le meilleur chemin en termes d'énergie, délai de transmission, débit, etc.

Les protocoles de routage conçus pour les RCSF sont différents de ceux conçus pour les réseaux Ad Hoc puisque les RCSF sont différents selon plusieurs critères comme:

- l'absence d'adressage fixe des nœuds tout en utilisant un adressage basé attribut.
- l'établissement des communications multi-sauts.
- l'établissement des routes liant plusieurs sources en une seule destination pour agréger des données similaires, etc.

II.3.5.4 Couche liaison de données

Elle est responsable de l'accès au media physique et la détection et la correction d'erreurs intervenues sur la couche physique. De plus, elle établit une communication saut-par-saut entre les nœuds. C'est-à-dire, elle détermine les liens de communication entre eux dans une distance d'un seul saut.

Parmi les protocoles de liaison de données, nous citons: SMACS (Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks) et EAR (Eavesdrop And Register).

II.3.5.5 Couche physique

Elle permet de moduler les données et les acheminer dans le media physique tout en choisissant les bonnes fréquences.

II.3.6 Objectifs de base [BEN06] [BEN07]

Les objectifs de base des WSN dépendent généralement des applications, cependant les tâches suivantes sont communes à plusieurs applications :

• Déterminer les valeurs de quelques paramètres suivant une situation donnée. Par exemple, dans un réseau environnemental, on peut chercher à connaître la température, la pression atmosphérique, la quantité de la lumière du soleil, et l'humidité relative dans un nombre de sites.

• Détecter l'occurrence des événements dont on est intéressé et estimer les paramètres des événements détectés. Dans les réseaux sur le trafic, on peut vouloir détecter le mouvement de véhicules à travers une intersection et estimer la vitesse et la direction du véhicule.
• Classifier l'objet détecté. Dans un réseau de trafic, un véhicule est-il une voiture, un bus, etc.

II.3.7 Contraintes et facteurs de conception de RCSF

La conception et la réalisation des RCSF sont influencées par plusieurs paramètres. Ces facteurs servent comme directives pour le développement des algorithmes et protocoles utilisés dans les RCSF *[MID05, SNB08]*.

- **Durée de vie du réseau :** L'énergie est une ressource qui doit être géré de façon judicieuse afin d'étendre la durée de vie du réseau, cette dernière c'est l'intervalle de temps qui sépare l'instant de déploiement du réseau de l'instant où l'énergie du premier nœud s'épuise. Selon l'application, la durée de vie exigée pour un réseau peut varier entre quelques heures et plusieurs années.

- **La tolérance aux pannes :** La défaillance ou le blocage des nœuds dans un réseau de capteurs peut être engendrés par plusieurs causes, notamment l'épuisement d'énergie, l'endommagement physique, ou les interférences liées à l'environnement.
La propriété de tolérance aux pannes est définie par l'habilité du réseau à maintenir ses fonctionnalités sans interruptions provoquées par la panne des capteurs. Elle vise donc à minimiser l'influence de ces pannes sur la tâche globale du réseau

- **Facteur d'échelle:** Le nombre de nœuds déployés pour une application peut atteindre des milliers. Dans ce cas, le réseau doit fonctionner avec des densités de capteurs très grandes. Un nombre aussi important de nœuds engendre beaucoup de transmissions inter nodales et nécessite que la station de base soit équipée de mémoire suffisante pour stocker les informations reçues. *[ASC02]*.

- **Ressources limitées** : En plus de l'énergie, les nœuds capteurs ont aussi une capacité de traitement et de mémoire limitée. En effet, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

- **Bande passante limitée :** Afin de minimiser l'énergie consommée lors de transfert de données entre les nœuds, les capteurs opèrent à bas débit. Typiquement, le débit utilisé est de quelques dizaines de Kb/s. Un débit de transmission réduit n'est pas handicapant pour un réseau de capteurs où les fréquences de transmission ne sont pas importantes.

- **Topologie dynamique :** La topologie des réseaux de capteurs peut changer au cours du temps pour les raisons suivantes **:**

- Les nœuds capteurs peuvent être déployés dans des environnements hostiles (champ de batail par exemple), la défaillance d'un nœud capteur est, donc très probable.
- Un nœud capteur peut devenir non opérationnel à cause de l'expiration de son énergie.
- Dans certaines applications, les nœuds capteurs et les stations de base sont mobiles.

- **Absence d'adressage fixe des nœuds:** Les nœuds dans les réseaux sans fil classiques sont identifiés par des adresses IP. Cependant, cette notion n'existe pas dans les RCSF. Ces derniers utilisent un adressage basé sur l'attribut du phénomène capté, on parle donc de l'adressage basé-attribut. En effet, les requêtes des utilisateurs ne sont pas généralement destinées à un seul nœud, mais plutôt, à un ensemble de nœuds identifiés par un attribut. Par exemple, identifier un ensemble de nœuds par « les nœuds qui captent le volume du CO2 dépassant 0,0375 % dans l'atmosphère».
- **Coût de fabrication :** Le coût de production d'un seul micro-capteur est très important pour l'évaluation du coût global du réseau, si ce dernier est supérieur à celui nécessaire pour le déploiement des capteurs classiques, l'utilisation de cette nouvelle technologie ne serait pas financièrement justifiée. Par conséquent, réduire le coût de production jusqu'à moins de 1$ par nœud est un objectif important pour la faisabilité de la solution des réseaux de capteurs sans fil.

II.3.8 Domaines d'application

Parmi les domaines d'application où la technologie des réseaux de capteurs est la plus intéressante et efficace, nous citons [*YAC08]:*

- **Militaire :**

Comme dans le cas de plusieurs technologies, le domaine militaire a été un moteur initial pour le développement des RCSF qui permettent la détection et la collection d'informations sur la position de l'ennemi, la surveillance des zones hostiles (contaminées) et la détection d'agents chimiques et bactériologiques dans l'air.

- **Environnemental :**

Des thermo-capteurs dispersés à partir d'un avion sur une forêt peuvent signaler un éventuel début d'incendie, contrôler la qualité de l'air et recueillir des informations diverses sur l'état du milieu naturel.

Sur les sites industriels, les centrales nucléaires ou dans les pétroliers, des capteurs peuvent être déployés pour détecter des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole).

Des RCSF peuvent détecter la présence humaine. Ainsi, la climatisation peut être déclenchée seulement aux endroits où il y a des personnes présentes. Une telle application permet de réduire la demande mondiale en énergie réduisant du même coup l'émission des gaz à effet de serre. Rien que pour les États-Unis, on estime cette économie à 55 milliards de dollars par an avec une diminution de 35 millions de tonnes des émissions de carbone dans l'air.

- **Santé :**

-Télésurveillance des signes vitaux et des niveaux d'activité à domicile des personnes agrées ou handicapées.

-Contrôle à distance des données physiologiques.

- Suivi et contrôle des médecins et des patients dans les hôpitaux.

- **Agriculture :**

Des nœuds peuvent être incorporés dans la terre. On peut ensuite questionner le réseau de capteurs sur l'état du champ (déterminer par exemple les secteurs les plus secs afin de les arroser en priorité). On peut aussi imaginer d'équiper des troupeaux de bétail de capteurs pour connaître en tout temps, leur position ce qui éviterait aux éleveurs d'avoir recours à des chiens de berger.

- **Maison :**

-Automatisation.

- **Commercial :**

- Contrôle environnemental dans les usines et les bureaux.
- Contrôle d'inventaire.
- Suivi des véhicules et détection des encombrements.

- **Sécurité :**

- Détection d'intrusions.

II.4 Conclusion

La technologie des réseaux de capteurs s'est beaucoup développée durant ces dernières années, et son impact sur les réseaux routiers urbains peut être d'une grande importance. Nombreux travaux se sont penchés sur le couplage de tels réseaux avec des technologies de gestion de trafic plus classiques. Nous soulignons la réactivité et la souplesse des réseaux de capteurs sans fil, qui possèdent un avenir certain dans le domaine des systèmes de transport intelligents.

CHAPITRE III : REALISATION DU SYSTEME DE SURVEILLANCE DU TRAFIC ROUTIER

III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter la conception de notre système. Nous présenterons aussi les choix réalisés et les solutions retenues pour satisfaire le projet étudié ainsi que les différents outils utilisés dans le développement du système.

Le système réalisé est un système destiné pour des applications de surveillance du trafic routier dont le but est d'acquérir des mesures du trafic : nombre de véhicules, débit de la route,…etc. Enfin, il faut noter que divers types de capteurs peuvent être utilisés avec notre système. Ces capteurs sont le plus souvent des capteurs de taille miniature qui peuvent être facilement fixés sur la route dans une plaque d'aluminium.

Les nouvelles exigences des tests et des mesures dans le domaine de la gestion du trafic peuvent être résumées par un besoin d'un système permettant l'acquisition, le prétraitement des mesures et la transmission par voie radio fréquence de ces mesures vers un système de traitement et de stockage plus puissant tel qu'un PC. Le système doit s'adapter avec diverses situations de mesures, doit être autonome, permettant l'interfaçage d'un ensemble de capteurs à sortie analogique ou numérique avec une portée de transmission de quelques dizaines de mètres.

III.2. Solution adoptée

Nous avons opté pour la solution d'un petit réseau de nœuds capteurs sans fil comme le montre la figure III.1, puisqu'il s'adapte bien avec les applications visées dans le domaine de la gestion du trafic.

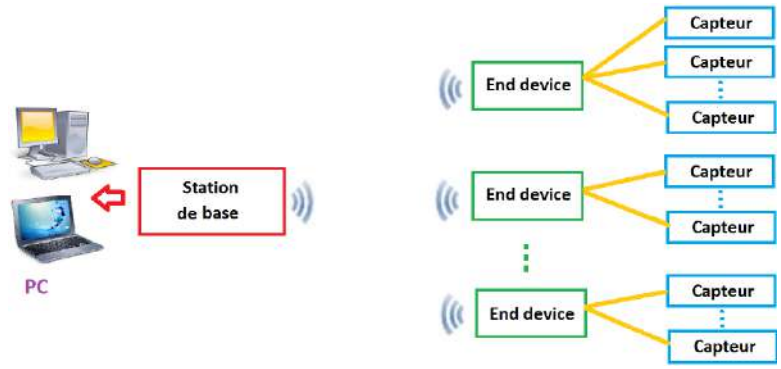


Figure III.1. *Schéma de principe du système réalisé.*

Ainsi le système qu'on se propose de réaliser dans le cadre de ce travail est constitué d'un ensemble de nœuds dont chacun est lié à un ou plusieurs capteurs. Le nœud pourra être fixé sur un segment du route, l'ensemble des mesures collectées par les nœuds après un prétraitement (conversion analogique numérique, moyennage, ...) sont envoyées vers une station de base qui est reliée à un PC de bureau ou à PC portable via liaison filaire (USB, Série, ...) pour assurer la visualisation, le traitement et le stockage des mesures reçues.

Pour la réalisation du réseau de capteur sans fil (WSN) de notre application nous avons opté pour l'utilisation d'un kit parmi ceux proposés par les constructeurs de ce type de systèmes. Cette solution nous a permis de contourner beaucoup de problèmes (matériels et techniques) liés à la réalisation des circuits hardware (station de base et nœuds de capteurs) et nous a permet d'économiser sur le temps du développement en plus des couts assez faible de certains kits proposés dans le commerce. Ainsi la plus grande tâche du travail sera orienté vers la partie soft (programmation) du système à réaliser puisque le hardware est disponible.

III.3. Module capteur utilisé [EDNK]

Le module capteur disponible est de type « E18-D80NK-N », Il fonctionne comme un interrupteur à distance à base d'un émetteur/récepteur infrarouge. Il a une portée de détection réglable, entre 3cm et 80cm, facile à utiliser, peu coûteux, utile pour les robots, les médias interactifs, ligne d'assemblage industrielle, etc.

Caractéristiques du module E18-D80NK-N :

- Modèle N° : E18-D80NK-N.
- Portée de détection : 3-80cm réglable.
- Tension d'alimentation : 5 V.
- Courant de charge : 100 mA.
- Diamètre : 18mm, Longueur : 45mm.
- Apparence : filetée cylindrique.
- Matériel : plastique.
- Température de fonctionnement : -25-70°C.
- Rouge : +5V ; Jaune : signal de sortie ; Vert : la masse.

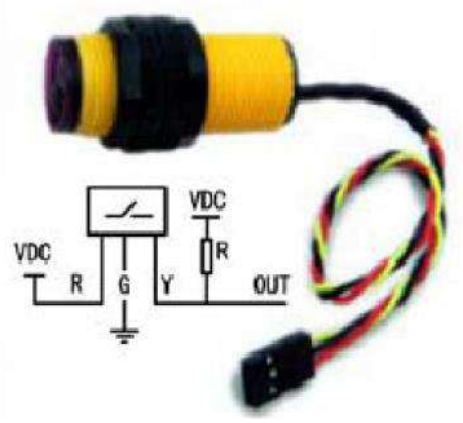


Figure III.2. *Module E18-D80NK-N.*

III.4. Présentation du kit eZ430 RF2500

Ce kit a une taille d'une clé USB, c'est un outil de développement complet avec une interface USB permettant de programmer le microcontrôleur MSP430 ainsi que l'émetteur-récepteur sans fil CC2500 2.4-GHz.

La carte électronique est équipée en plus du MSP430 qui peut fonctionner à 16 MHz et de la puce RF CC2500. Il a 18 E/S configurables, deux LEDs (verte et rouge), un bouton poussoir et une antenne intégrée. L'eZ430-RF2500 utilise l'environnement de développement IAR Embedded Workbench Integrated Development Environment (IDE) ou le Code Composer Essentials (CCE) pour éditer, programmer et déboguer une application. [HAIE]

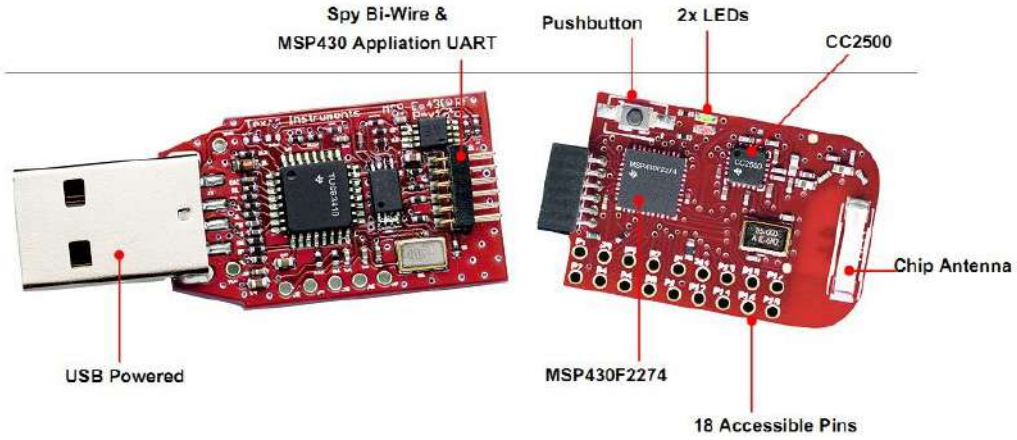


Figure III.3. *Kit du développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments.*

(À gauche : le programmateur USB, à droite : nœud capteur sans fil)



Figure III.4. *Nœud capteur sans fil : MSP430-RF2500 avec module d'alimentation.*

III.4.1. Contenu du kit eZ430 RF2500

Le kit eZ430-RF2500 peut être employé comme instrument de développement autonome. En plus, le nœud peut également être isolé de l'interface de programmation et intégrer dans une autre conception en enlevant la clôture en plastique.

Le PCB d'un nœud comporte un microcontrôleur MSP430F2274 et la plupart de ses E/S sont facilement accessibles. Les lignes d'E/S sont montrées sur la Figure III.5 et décrites dans les Tableaux III.1 et III.2 ([HAIE , TXI]).

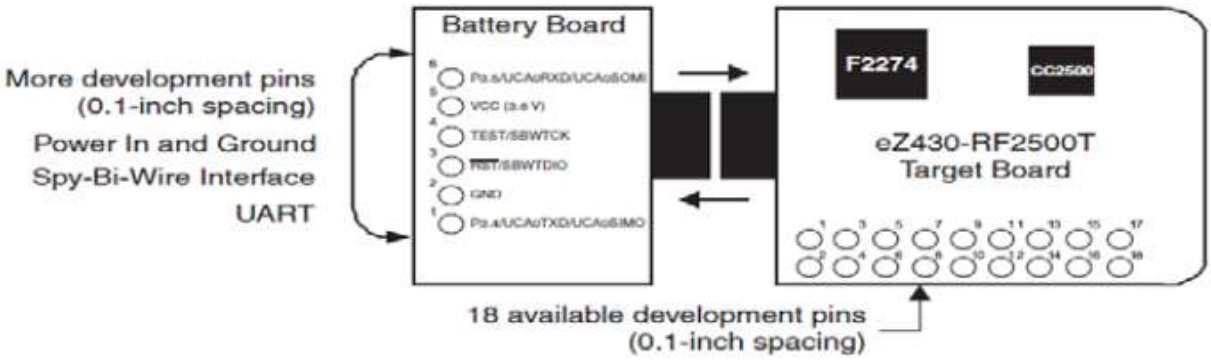


Figure III.5. *Entrées/sorties du support batterie et du nœud eZ430-RF2500.*

Le *Tableau III.1* regroupe la désignation des entrées/sortie du support batterie

Tableau III.1. *Désignation des entrées/sorties du support batterie.*

Pin	Fonction	Description
1	P3.4/UCA0TXD/ UCA0SIMO	E/S numérique d'usage général / Sortie de transmission du module UART / Entrée de communication SPI en mode esclave
2	Gnd	Référence de la tension.
3	~RST / SBWTDIO	Entrée de remise à zéro / lignes E/S de données pendant la programmation et le test de l'interface Spy-Bi-Wire
4	TEST / SBWTCK	Entrée de sélection du mode Test pour l'interface JTAG/ ligne d'horloge pendant la programmation et le test de l'interface Spy-Bi-Wire
5	Vcc (3.6 V)	Tension d'alimentation.
6	P3.5/UCA0RXD/ UCA0SOMI	E/S numérique d'usage général / Entrée de réception du module UART / sortie de communication SPI en mode esclave

Tableau III.2. *Entrées/sorties du connecteur d'un Noeud eZ430-RF2500.*

PIN	Fonction	Description
01	GND	Ground reference
02	VCC	Supply voltage
03	P2.0 / ACLK / A0 / OA0|0	General-purpose digital I/O pin ACLK output / ADC10, analog Input A0
04	P2.1 / TAINCLK / SMCLK / A1 / A0O	General-purpose digital I/O pin / ADC10, analog input A1 Time_A, clock signal at INCLK, SMCLK signal output
05	P2.2 / TA0 / A2 / OA0|1	General-purpose digital I/O pin ADC10, analog input A2 Time_A, capture: CC|0B input/BSL receive, compare : OUTO output
06	P2.3 / TA1 / A3 / VREF- / VeREF- / OA1|1 / OA1O	General-purpose digital I/O pin / Time_A, capture: CC|1B input, compare: OUT1 Output / ADC10, analog input A3 / negative reference voltage output/input
07	P2.4 / TA2 / A4 / VREF+ / VeREF+ / OA1|0	General-purpose digital I/O pin / Timer_A, compare : OUT2 output / ADC10, analog input A4 / positive reference voltage output/input
08	P4.3 / TB0 / A12 / OA0O	General-purpose digital I/O pin / ADC10 analog input A12 / Timer_B, capture : CC|0B input, compare : OUT0 output
09	P4.4 / TB1 / A13 / OA1O	General-purpose digital I/O pin / ADC10 analog input A13 / Timer_B, capture : CC|1B input, compare : OUT1 output
10	P4.5 / TB2 / A14 / OA0|3	General-purpose digital I/O pin / ADC10 analog input A14 / Timer_B, compare : OUT2 output
11	P4.6 / TBOUTH / A15 / OA1|3	General-purpose digital I/O pin / ADC10 analog input A15 / Timer_B, switch all TB0 to TB3 outputs to high impedance
12	GND	Ground reference
13	P2.6 / XIN (GDO0)	General-purpose digital I/O pin / Input terminal of crystal oscillato
14	P2.7 / XOUT (GDO2)	General-purpose digital I/O pin / Output terminal of crystal oscillator
15	P3.2 / UCB0SOMI /	General-purpose digital I/O pin

	UCB0SCL	USCI_B0 slave out/master in when in SPI mode, SCL |2C clock in |2C mode
16	P3.3 / UCB0CLK / UCA0STE	General-purpose digital I/O pin USCI_B0 clock input/output / USCI_A0 slave transmit enable
17	P3.0 / UCB0STE / UCA0CLK / A5	General-purpose digital I/O pin / USCI_B0 slave transmit enable / USCI_A0 clock Input/output / ADC10, analog input A5
18	P3.1 / UCB0SIMO / UCB0SDA	General-purpose digital I/O pin / USCL_B0 slave in/master out in SPI mode, SDA |2C data in |2C mode

III.4.2. Caractéristiques des composants de base

Chaque nœud comporte un microcontrôleur MSP430F2274 et une puce RF CC2500 qui ont les caractéristiques suivantes :

MSP430F2274 :

- ✓ Puissance de traitement de 16 MIPS.
- ✓ Convertisseur A/N 10 bits de type SAR avec fréquence max de 200 ks/s.
- ✓ Deux amplificateurs opérationnels intégrés.
- ✓ Chien de garde, Timer_A3 de 16 bits et Timer_B3.
- ✓ Module de communication USCI soutenant : UART/LIN, (2) SPI, I2C, ou IrDA.
- ✓ Cinq modes de basse consommation d'énergie jusqu'a 700 nA.

CC2500 :

- ✓ émetteur récepteur (RF) radiofréquence à 2.4-GHz.
- ✓ Débit programmable jusqu'à 500 Kbps.

La série MSP430 de Texas Instruments une série de microcontrôleurs 16 bits à très basse consommation fonctionnant à une fréquence max de 16 MHz. Trois signaux d'horloge sont générés : l'horloge master (MCK) qui est utilisée par le CPU et qui est alimentée par un oscillateur haute vitesse DC0, l'horloge auxiliaire (ACLK) et l'horloge sous maître (SMCLK) qui est utilisée par certains périphériques. Il existe cinq modes de fonctionnement basse consommation (LPM0- LPM4) obtenus en désactivant sélectivement certaines horloges. La F*igure III.6* représente la consommation de courant pour chaque mode. Pour notre application

nous utiliserons le mode LPM3, qui représente un mode où l'horloge du Timer reset active ([HAIE , TXI]).

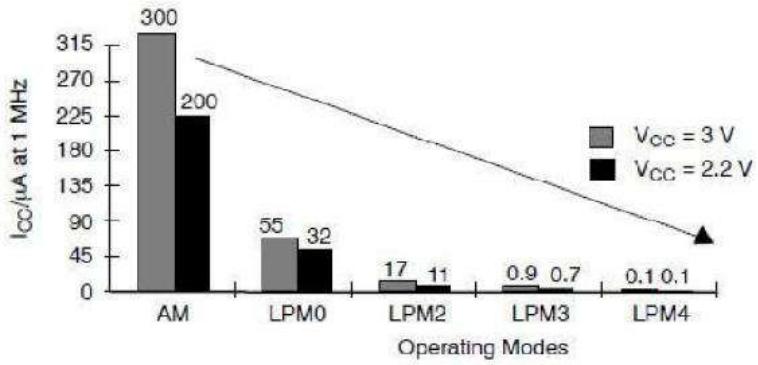


Figure III.6. *Consommation du courant pour chaque mode.*

III.4.3. Protocole SimpliciTI [HAIE]

SimpliciTI est un protocole de communication RF de faible puissance destiné pour les petits réseaux sans fil. Ce protocole open source est un excellent outil pour la construction d'un réseau avec des dispositifs fonctionnant sur batterie en utilisant des faibles puissances il est pris en charge par les microcontrôleurs MSP430. SimpliciTI a été conçu pour la mise en œuvre facile sur plusieurs plateformes de produits RF (CC1XXX/CC25XX) de Texas Instruments. La figure suivante montre l'organisation en couches de ce protocole.

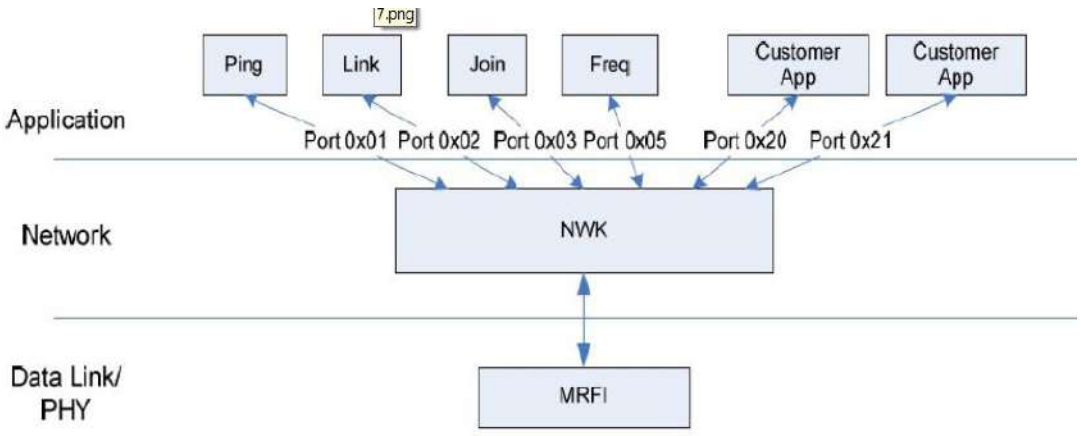


Figure III.7. *Couches logiques du protocole SimpliciTI.*

Ce protocole est constitué de 3 couches :

- **La couche application :** qui représente la partie du soft à implémenter par l'utilisateur pour manipuler les capteurs et assurer la transmission entre le « end device » et la « station de base ».
- **La couche réseau :** cette couche permet de gérer les queues de transmission et de réception (TX et RX) et permet d'acheminer les paquets à leurs destinations qui est toujours une application désignée par un numéro de Port.
- **La couche physique :** peut être subdivisée en deux sous-couches :
  - BSP (Board Support Package): qui représente un ensemble d'instructions et de fonctions manipulant les périphériques de communications comme l'interface SPI, I2C, ...
  - MRFI (Minimal RF Interface) : qui représente le hardware minimal nécessaire à la communication.

III.5. Développement du projet sous l'IAR Embedded Workbench

IAR Embedded Workbench pour MSP430 [HAIE] est un environnement de développement intégré (IDE) pour la génération et le débogage des applications embarquées pour les microcontrôleurs MSP430. L'IDE comprend un compilateur de code C/C++, un assembleur, un débogueur et un simulateur. La version light offre la possibilité d'écrire un code de taille limitée (la limitation de la taille du code du compilateur C/C++ est de 4 Ko pour les dispositifs MSP430 traditionnels de 8 Ko pour les MSP430X de 60 KB Flash).

III.5.1 Création du projet

Texas Instruments a développé un ensemble de pilotes pour le Kit eZ430-RF2500 dans le cadre du projet SimplicitTI, Pendant la création du projet on déclare le type du microcontrôleur (MSP430-F2274), la radio (CC2500) monté sur le capteur et les pilotes nécessaires dans leurs champs spécifique afin qu'ils seront chargés dans le projet crée.

Notre travail est un projet crée et nommé eZ430-RF2500-trafic-Monitor, il se divise en 2 parties :

- **Access Point « AP »** avec fichier code source en C : AP.C
- **End Device « ED »** avec fichier code source en C : ED.C

Et chaque partie contient les pilotes nécessaires pour le projet :

Bsp : (Board Support Package). Contient les fichiers pour les services de base, les fichiers de macro utilitaires et charge tous les drivers des composants de la carte.

Mrfi : (Minimal RF Interface). Assure tous les fonctions et les applications concernant la radio, il définit les objectifs d'abstraction pour la radio et contient tous les fichiers pour les services minimaux de l'interface radio fréquence.

Après la création du projet WSN on obtient la plateforme représenté par la F*igure III.8.*

III.5.2 Construction et chargement du projet dans les nœuds « AP » et « ED » sous IAR

On active une fois la partie correspondante à celle qui sera une station de base (AP) et une deuxième fois celle qui sera le nœud capteur terminal (ED). Ensuite on appelle la commande de construction et chargement.

Le programme est chargé dans la mémoire flash du microcontrôleur (MSP430F2274) de chaque nœud capteur (AP et ED) par le biais du programmateur eZ430 branché au port USB du pc [HAIE] (voir annexe).

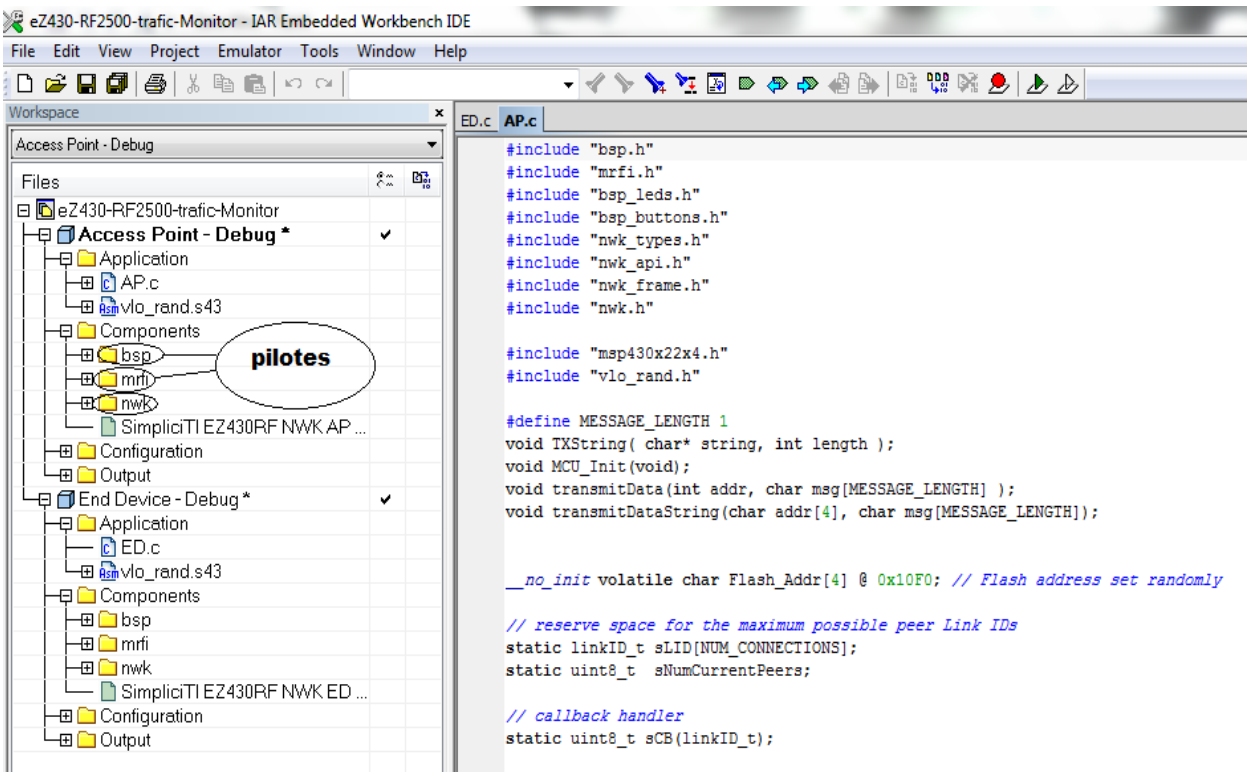


Figure III.8. *Capture d'écran du projet réalisé sous l'environnement IAR.*

III.6. Organigrammes des programmes des nœuds AP et ED

Le projet réalisé nommé eZ430-RF2500-trafic-Monitor assure la communication entre les différents nœuds capteurs du réseau (End device : EDs) avec la station de base (point d'accès: AP). Chaque nœud capteur compte le passage des véhicules et transmis la valeur comptée tous les 30 secondes vers l'AP. La station de base récupère tous les messages et elle les envoie vers le PC.

III.6.1. Organigramme du programme du point d'accès (AP)

Le BSP_Init () de SimpliciTI initialise les interfaces matérielles spécifiques à bord (tels que les LEDs) qui doivent être utilisés dans l'application.

La fonction MCU_Init () effectue d'autres initialisations spécifiques du MSP430 pour l'application. Ceux-ci comprennent:

- L'ACD et le MCLK qui sont réglés pour fonctionner à 8 MHz.
- Le Timer_A est réglé à déclencher une interruption à des intervalles de 30 seconde.
- L'interface de communication série universel (USCI ou UART) est initialisé à communiquer avec le PC via le port COM à 9600 Baud.

Une fois l'initialisation du matériel est terminée, le programme appelle la fonction SMPL_Init (SCB) pour initialiser le module radio et le protocole réseau SimpliciTI. Le paramètre SCB est une fonction pointeur vers une fonction exécutée dans la routine de service d'interruption (ISR) lors de la réception des paquets par l'AP.

La fonction SCB filtre le paquet reçu en fonction de son lien ID pour identifier la source de la transmission. Un ID de lien de 0 identifie une connexion demandé. Lors de l'acceptation d'une demande d'établissement d'une connexion d'un ED, l'AP et l'ED doivent alors créer un lien pour la communication. Chaque lien est énuméré par l'AP qui attribue un ID incrémenté chaque fois qu'un nouveau ED rejoint le réseau.

En raison de considérations d'application, notre réseau sans fil permet à un nombre maximal de huit dispositifs à être relié au point d'accès. Selon l'ID de lien, la fonction SCB identifie et incrémente le sPeerFrameSem ou sémaphores sJoinSem. Ces deux sémaphores

contrôlent le déroulement du programme après l'initialisation du réseau. Une valeur retournée supérieur à zéro indique au protocole SimpliciTI que la fonction a traité la trame reçue et libère la mémoire des trames pour la réutilisation. La fonction SCB dans AP.c renvoie zéro parce que le programme laisse la trame reçue dans le tampon d'entrée pour être manipulé par l'application et réduire la quantité de temps passé dans le cadre d'ISR du protocole SimpliciTI. Quand il est prévu pour maintenir plusieurs liens vers d'autres applications/nœuds dans le réseau, il est particulièrement important de garder le sous-programme de l'ISR petit afin de minimiser le risque de perdre la réception d'autres paquets.

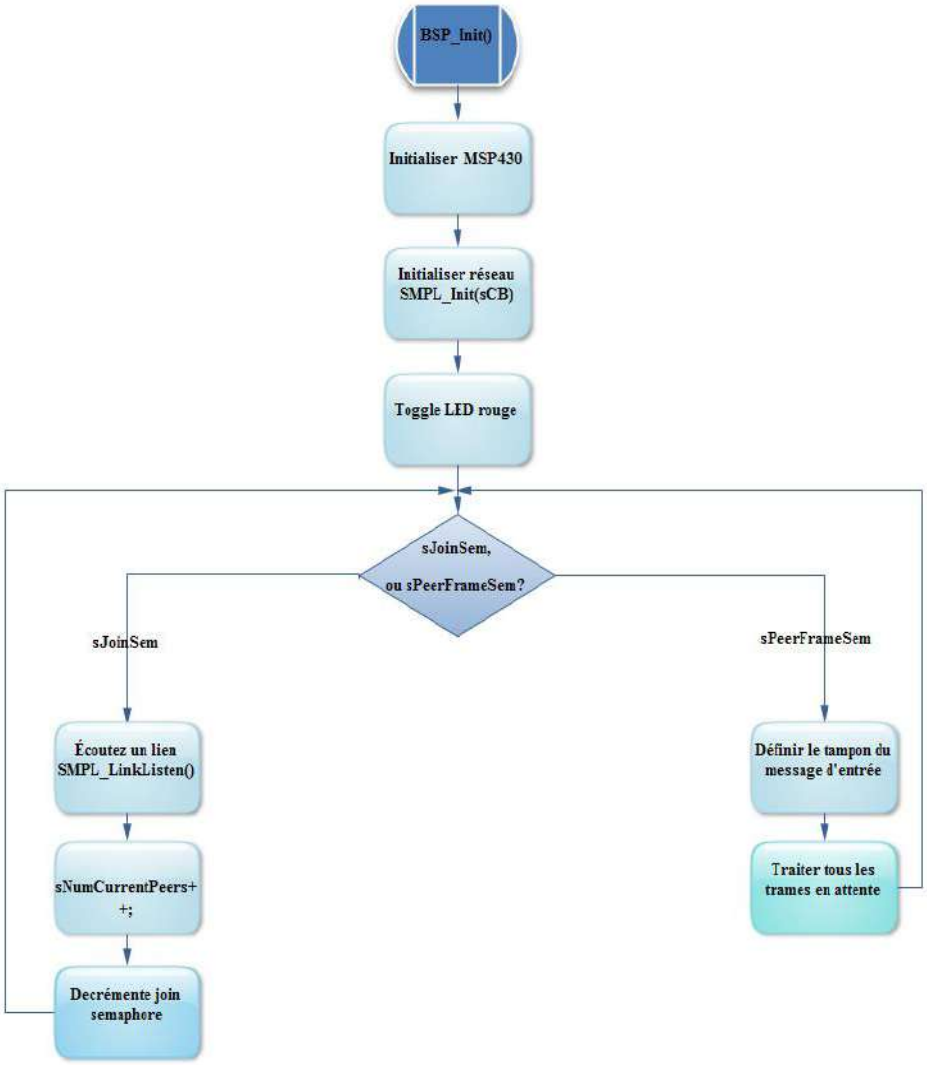


Figure III.9. *Organigramme principal du programme de l'AP.*

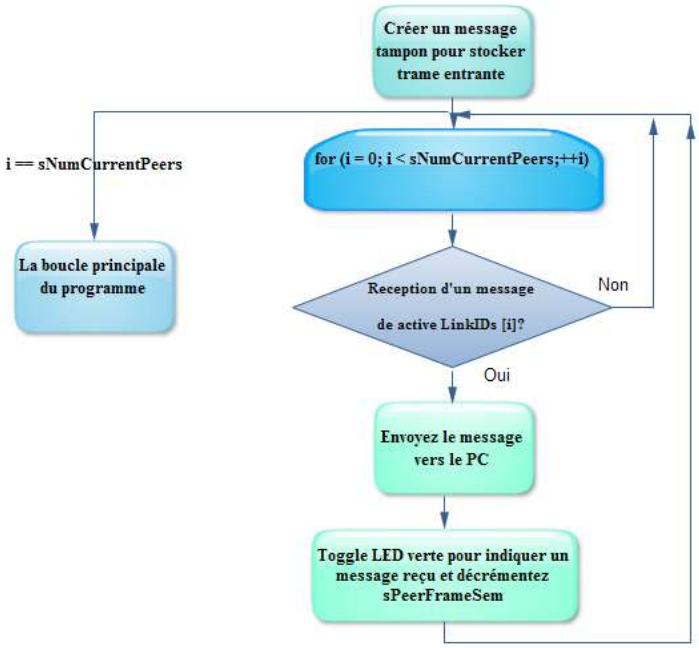


Figure III.10. *Organigramme du traitement des trames en attente au niveau de l'AP.*

III.6.2. Organigramme du programme du nœud capteur (ED)

Après l'initialisation et l'établissement d'une connexion avec l'AP, le nœud capteur (ED) détecte le passage des véhicules par le biais de l'interrupteur infra rouge. Ce dernier est implémenté par un sous-programme d'interruption qui correspond à l'entrée numérique P2.0 du MSP430. Un deuxième sous-programme d'interruption déclenché par le timer qui compte le délai choisi (30 seconde) pour communiquer la valeur comptée des véhicules détectés à la station de base.

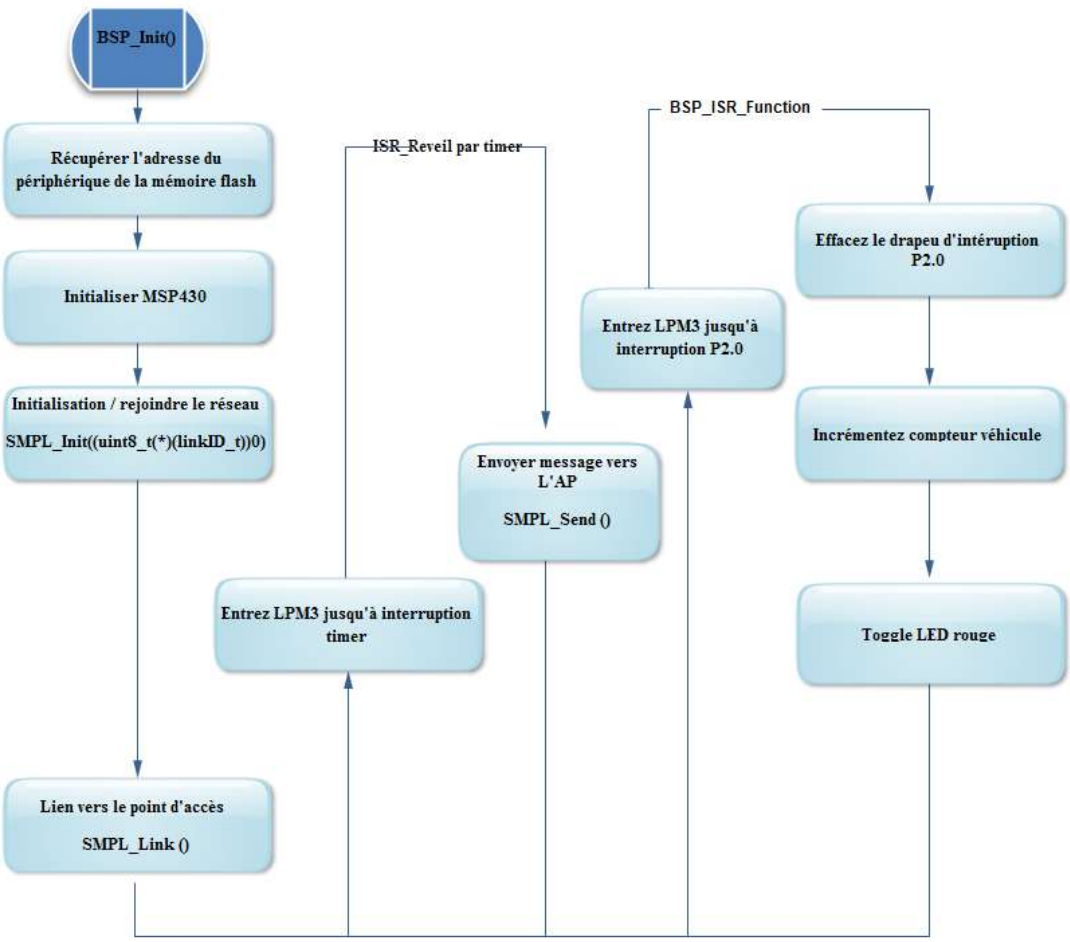


Figure III.11. *Organigramme du programme du nœud capteur (ED).*

III.7. Test pratique du système globale de contrôle du trafic routier sur PC

On a construit une maquette d'une intersection pour faire des tests pratiques du système de surveillance du trafic routier. A cause de manque de matériels, on a mis à côté de la voie A1 et de la voie B1 (voir figure III.12), deux modules capteurs E18-D80NK-N connectés aux deux nœuds capteurs sans fil. Ces deux EDs envoient chaque 30 secondes le comptage des véhicules détectés vers la station de base. Ensuite, cette dernière transmis le nombre de véhicules des deux voies vers le PC, ou il affiche l'information sur le trafic en temps réel. Cet affichage est réalisé par une interface nommé trafic_monitor.jar développé en langage java. Cette application est exécutée sous un script Hyperterminal qui est utilisé pour lire les données du port COM série émulé du port USB et connecté à la clé USB où la station de base est montée. Donc, on affiche sur le PC les valeurs des données reçus de chaque capteur du réseau.

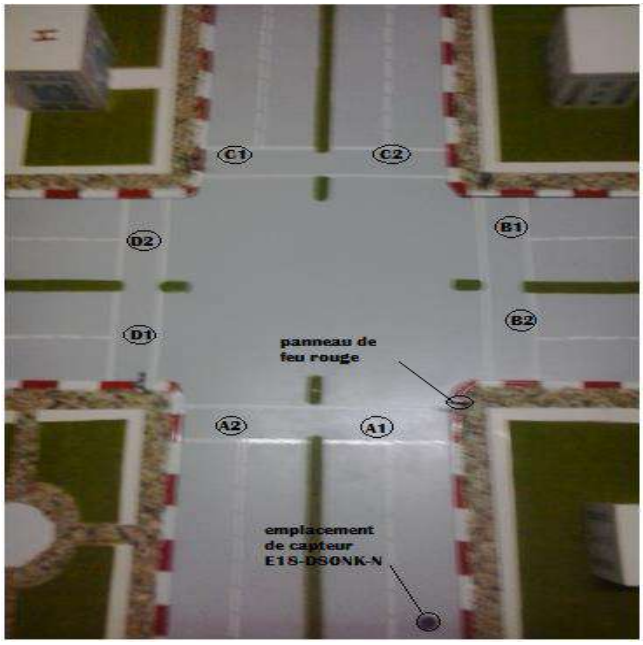


Figure III.12. *Emplacement des modules capteurs E18-D80NK-N.*

Après branchement et montage des différents modules, On lance l'application de l'interface sur le PC, les résultats obtenus sont représentés sur la *Figure III.13.*

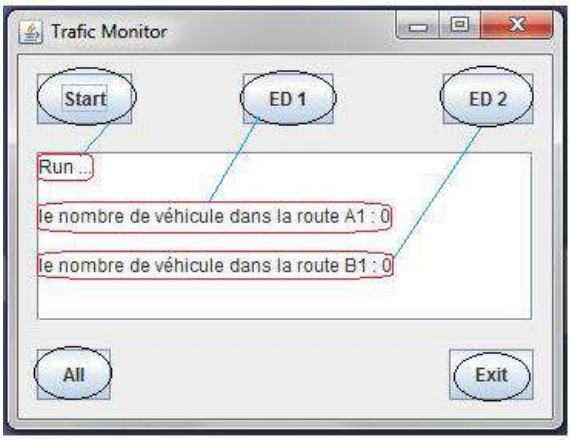


Figure III.13. *Interface avant exécution.*

Bouton Start : démarre l'exécution.

Bouton ED1 : responsable d'afficher le nombre de véhicule qui passe dans la voie A1.

Bouton ED2 : responsable d'afficher le nombre de véhicule qui passe dans la voie B1.

Bouton All : pour afficher le résultat dans les deux voies (A1 et B1).

Après un test de passage des véhicules auprès les deux voies, on lance l'exécution, on obtient les résultats montrés sur la F*igure III.14*.

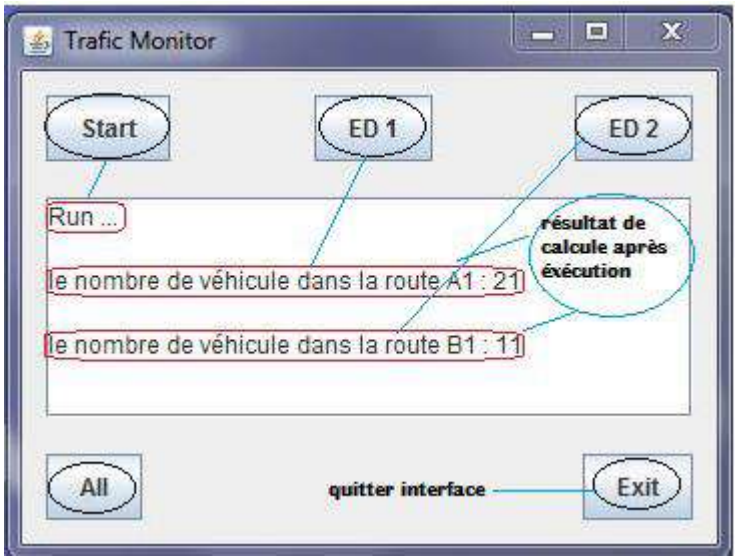


Figure III.14. *Interface après exécution.*

Et pour finir le comptage des véhicules dans chaque voie en cliquant sur :
Bouton Exit : quitter l'interface.

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés les outils software et hardware utilisés dans la réalisation de notre système de contrôle du trafic routier. En plus, nous avons décrit les différents modules constituants ce système. Enfin, nous avons conclu notre travail par un test pratique validant le bon fonctionnement du système de surveillance du trafic.

Conclusion Générale

Le domaine des transports, et plus singulièrement celui de la circulation routière, est l'objet d'innovations permanentes, tant sur le plan de la conception de modèles que sur le plan technologique. Les moyens de recueil de données de trafic ont ainsi bénéficié de cette dynamique favorisant l'amélioration des moyens techniques existants avec parfois d'apparition de nouveaux capteurs ou de nouvelles architectures.

Cependant, dans le cadre de l'exploitation de trafic, un système de recueil de données, aussi évolué soit-il, ne permet pas de fournir les indicateurs nécessaires aux missions d'exploitation et d'information des usagers.

Il apparait que la diversification des collectes des données, donc de sources d'information, favorisée par la multiplicité des acteurs (gestionnaires, exploitants de réseaux et opérateurs) et par la technologie (véhicules traceurs) permet de fournir une meilleure image (globale et complète) de l'état du trafic et, par là même, de faire face aux imperfections.

L'accessibilité de ces nouvelles sources, notamment avec le développement récent des réseaux de capteurs sans fil facilite la mise en place de systèmes de supervision du trafic à faible cout, utilisant conjointement des données collectées par des véhicules traceurs et des données issues des capteurs au sol traditionnels.

L'objectif de notre étude était pour le bien de touts les utilisateurs des voies dans un milieu urbain, afin de diminuer le sur flux de trafic routier et assurer le maximum de fluidité mécanique.

Notre approche de développement était surtout d'avoir un système qui donne de bonnes résultats avec un minimum de cout et qui demande un minimum d'entretien.

Enfin, nous proposons l'amélioration du système réalisé, par l'utilisation d'un autre type de capteurs à faible consommation énergétique. Nous suggérons les capteurs magnétiques du type HMC 1002 ou HMC 1052.

Références bibliographiques

[AKK 05] K. Akkaya, and M. Younis, «A Survey on Routing Protocols for Wireless Sensor Networks». Journal of Ad Hoc Networks, Vol .3, No . 3, May 2005, pp.325-349.

[AKS010] A. Kesharwani, V. Sadaphal, and M. Natu. Empowering bus transportation system using wireless sensor networks. In 7th International Conference on High Performance Computing (HiPC 2010), Goa, India, Dec. 2010.

[ASKD80] A. Sims and K. Dobinson. The sydney coordinated adaptive traffic (scat) system philosophy and benefits. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 29(2) :130 – 137, May 1980.

[BEN07] Bensalem Iméne, « Réseaux de Capteurs Sans Fils » rapport de recherche, Université Mentouri de Constantine Faculté des sciences de l'ingénieur- Département de l'informatique.

[BEY09] Beydoun Kamel «Conception d'un protocole de routage hiérarchique Pour les réseaux de capteurs. » Thèse pour l'obtention d'un grade de Docteur de l'université de Franche-Comté en informatique. Décembre 2009.

[BJM88] Blosseville J.M et al 1988 *Traitement d'image appliqué à la mesure du trafic : le système TITAN*, Revue RTS n°18-19.

[BLW011] B. Liu and W. Liu. Evaluation of traffic control methods at traffic circles. In Control and Decision Conference (CCDC), 2011 Chinese, pages 3371 –3377, May 2011.

[BMCJ87] B. M Chard and C. J .Lines .Transyt - the latest developments. Traffic engineering & control, 28(7-8):387–390, 1987.

[BOU08] Boubiche Djallel Eddine «Protocole de routage pour les réseaux de

Capteurs Sans fil» mémoire de Magistère en Informatique. Université de l'Hadj Lakhdar-Batna Faculté des sciences de l'ingénieur. 2008.

[BOU12] Bouchakour Khaled « Routage hiérarchique sur les réseaux de capteurs Sans fil: Protocole KhLCH (K-hop Layered Clustering Hierarchy).» Mémoire Présenté pour l'obtention d'un diplôme de MAGISTER en informatique, Ecole Nationale Supérieure de l'Informatique (ESI) Ex Institut National de la formation en informatique (INI), 2012.

[BR05] Bour R., (2005) Panorama des méthodes de recueil des données routières, Session de formation continue ENPC/PFE sous la direction de S. Cohen.

[CL90] C. Lee. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller.IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 20(2) :419 –435, mar/apr 1990.

[CS93] Cohen S., *Ingénierie du trafic routier, Éléments de théorie du trafic et applications*,Presses de l'ENPC, Paris, 1993, (2ème édition).

[DEH05] Dehni Lahcene «LEA2C : Une nouvelle approche de routage dans les réseaux de capteurs pour l'optimisation de la consommation d'énergie» Laboratoire d'Informatique de Paris Nord UMR 7030 du CNRS, Université Paris 13 99, avenue J.B. Clément - 93430 Villetaneuse.

[DRRB91] D. Robertson and R. Betterton. Optimizing networks of traffic signals in real time-the scoot method .IEEE Transactions on Vehicular Technology, 40(1) :11 –15, Feb. 1991.

[EDNK] e18-d80nk-ds.pdf.

[HAIE] Implantation de capteurs communicants enfouis dans le béton à l'aide de l'outil de développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments» par Hamza AYZI et Ismaïl ELHASNAOUI.

[HEI00] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, H. Balakrishnan "Energy-efficient communication protocol for wireless micro sensor networks", IEEE Hawaii International Conference on System Sciences, 2000.

[HEI02] W..R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H.Balakrishnan, «An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Micro sensor Networks», IEEE Transactions on the wireless communications, Vol. 1, No. 4, pp.660-670, Oct. 2002.

[LAK07] L. E. Y. Mimbela and L. A. Klein. Summary of vehicle detection and surveillance technologies used in intelligent transportation systems. Federal Highway Administration, ntelligent Transportation Systems Joint Program Office, 2007.

[LEH09] Lehsaini Mohammed «Diffusion et couverture basées sur le clustering dans les réseaux de capteurs : application à la domotique» Thèse de Doctorat en informatique2009. Université A.B Tlemcen Faculté des Sciences pour l'Ingénieur && Université de Franche-Comté U.F.R Sciences et Techniques École Doctorale SPIM.

[LIND02] S. Lindsey and C. Raghavendra, «PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems». Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, vol. 3, Big Sky, MT, USA, March 2002, pp. 1125-1130.

[LNA04] Lyes Khelladi, Nadjib Badache « Les réseaux de capteurs: état de l'art », Rapport de recherche, Algérie, Février 2004.

[MHNY06] M. Abbas, H. Charara, N. Chaudhary, and Y. s. Jung .Distributed architecture and algorithm for robust real-time progress evaluation and improvement. Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2006.

[MOH11] Mohamed Aissani «Optimisation du routage dans les réseaux de capteurs pour les applications temps -réel», Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat en informatique (USTHB), Mars 2011.

[MOH12] Mohamed Wassim jmal «Key Management of wireless sensor network» International journal of sciences and techniques of automatic control & Computer engineering, IJ-STA, volume 6, N 1, June 2012.

[MYH07] M. Tubaishat, Y. Shang, and H. Shi.Adaptive traffic light control with wireless sensor networks .In 4th IEEE Conference on Consumer Communications and Networking, 2007.

[NAD10] Nadia Bounegta, « Approche distribuée pour la sécurité d'un réseau de capteurs sans fils (RCSF) »Université de Bechar - Ingénieur d'état en Informatique 2010.

[NHM04] N. B. Hounsell, F. N. McLeod, and B. P. Shrestha. Bus priority at traffic signals : Investigating the options. In IEE Conference Publication, number 501, pages 287–294. Institution of Engineering and Technology, 2004.

[NHS07] N. Hounsell, B. Shrestha, F. McLeod, S. Palmer, T. Bowen, and J. Head. Using global positioning system for bus priority in london : traffic signals close to bus stops. Intelligent Transport Systems, IET, 1(2) :131 –137, June 2007.

[OMT06] OMT. Conférence sur les déplacements écologiques en europe, 2006.

http ://www.busandcoach.travel/download/factsheets/frgreen.pdf.

[PEFL] Performance evaluation of Los Angeles adaptive traffic control system (atcs) on an arterial corridor.
http://leonard.csusb.edu/outreach/documents/PERFORMANCEEVALUATIONOFLOSANGELES.pdf.

[PHA09] Pham Van Viet « Études des modèles sans fil dans NS2» rapport, IFI institut de la francophonie pour l'informatique, Hanoï, Septembre 2009.

[PH90] May A.D 1990 *Traffic flow fundamentals*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New- Jersey.

[PSCS09] P. Shan-Chen, S. Yan-Sen, L. Ye, S. Jie, and Z. Huai-Zhou. A study on the model of the traffic signs in the traffic circle. In International Conference on Information engineering and Computer Science (ICIECS 2009), pages 1 –4, Dec. 2009.

[RAH09] Rahim Kacimi, «Techniques de conservation d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil », Thèse en vue de l'obtention du titre Docteur de l'université de Toulouse, INPT, France 2009.

[SAM10] Samir Athmani «Protocole de sécurité pour les réseaux de capteur sans fil» Mémoire de magistére en informatique, Université Hadj Lakhder- Batna, Faculté Des sciences de l'ingenieur, Juillet 2010.

[SC04] S. Coleri, S. Y. Cheung, and P. Varaiya. Sensor networks for monitoring traffic. In Allerton Conference on Communication, Control and Computing, 2004.

[SM011] IBM. Sondage mondial ibm sur la pénibilité du navettage : congestion routière en baisse, pénibilité nettement en hausse, June 2011.
Http : //www.ibm.com/news/ca/fr/2011/09/08/u251344d61892u91.html.

[SNB08] Sofiane Moad, NizarBouabdallah «La consommation d'énergie dans les réseaux de capteurs sans fil », Rapport de recherche, Institut De formation supérieure en informatique et communication IFSIC, Rennes 2008.

[TAY00] Tayeb Lemlouma, « Le routage dans les réseaux mobiles Ad Hoc », Mini projet, Institut National de Recherche en Informatique et Automatique INRIA, 2000.

[TEOV] http://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/puehfpp.html.

[TMYW88] Taylor M.A.P and Young W 1988 *Traffic Analysis. New Technology & New Solutions*, Hargreen Publishing Company, Australia.

[TXI] « Texas Instruments » ; www.ti.com.

[VRT010] La nouvelle dynamique stationnement. Ville Rail et Transports, 507 :30–33, Nov. 2010.

[WY02] W. Wei and Y. Zhang. Fl-fn based traffic signal control. In IEEE International Conference on Fuzzy Systems, volume 1, pages 296 –300, 2002.

[XZHZ09] X. Zeng and H. Zheng .The intelligent control and modeling of a traffic circle. In International Conference on Information Engineering and Computer Science (ICIECS 2009) , pages 1 –4, Dec 2009.

[YAC08] Yacine Challal, « Réseaux de Capteurs Sans Fils », Cours, Systèmes Intelligents pour le Transport, Université de Technologie de Compiègne, France, 17 Novembre 2008.

[YAC12] Yacine Younes, «Minimisation d'énergie dans un réseau de Capteurs», Mémoire de magister, université Mouloud Mammer de Tizi-Ouzou, Septembre 2012.

[YOUS10] Yousef Yaser «Routage pour la Gestion de l'Energie dans les Réseaux de Capteurs Sans Fil» Thèse de Doctorat Spécialité INFORMATIQUE, UNIVERSITE DE HAUTE ALSACE Faculté des Sciences et Techniques