*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

**Université Yahia Farés de MEDEA**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département du Génie Electriques et de l'Informatique**



## Projet de Fin d'études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme**
**De Master en Génie électrique**

***Option : Systèmes Intelligents et Communiquants***

## THEME

# Développement et évaluation d'un système de mesure du trafic Routier à base d'un réseau de capteurs sans fil

**Proposé et dirigé par:**

**Dr. Mohamed OULD ZMIRLI**

**Préparé et présenté par :**

***Boucherit Yamena*** ***Douifi Nadia***

**- ANNEE UNIVERSITAIRE 2015 /2016 -**

*

# Remerciement

*Tout d'abord nous aimerons remercier DIEU de nous avoir offert le courage de réaliser ce projet et de nous avoir éclairé notre lanterne tout au long des années de nos études.*

*Ce travail est l'aboutissement d'un long cheminement au cours duquel nous avons bénéficié de l'encadrement, des encouragements et du soutien de plusieurs personnes, à qui nous tenons à dire profondément et sincèrement merci :*

*Nous adressons nos vifs remerciements au Professeur* ***Mohamed Ould zmirli****, qui a bien accepté de nous encadrer, et n'est pas hésité à nos soutenir dès le départ et à accepter d'endosser la charge de promoteur, malgré leur nombreux occupations. Il a dirigé et accompagné de très près, à vrai dire pas à pas, jour par jour, et avec beaucoup de patience. Son soutien, sa clairvoyance et ses compétences n'a été d'une aide inestimable et aussi pour son amabilité et sa bienveillance au bon déroulement de notre travail de recherche.*

*Nos remerciements les plus chaleureux vont à tous nos camarades au* ***Master 2 sic*** *pour leurs encouragements et pour l'ambiance agréable tout au long de ce travail et en particulier à* ***NADIA*** *pour sa présence dans les moments difficiles et grâce à qui nous avons passé d'excellents moments.*

*Nous remercions tous les membres du jury pour avoir bien voulu donner de Leur temps pour lire ce travail et faire partie des examinateurs. Certains ont dû prendre en compte de se déplacer de leur endroit de travail.*
*Qu'ils en soient particulièrement remerciés.*

*Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nos donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.*

*Que ce travail témoigne de mes respects et J'ai l'immense honneur de dédier :*

*A Ma tendre Mère* ***Farida*** *: Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher Père* ***Salem*** *: Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*A mes oncles :* ***Farid*** *et* ***Amine***

*A mes sœurs :* ***Amel, Sahar, Sarah***

*A mon frère :* ***Mohamed***

*Toute ma famille et mes proches sans exception. : Souhila et ses enfants*

*A mon binôme* ***Yamna*** *: Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie.*

*A mes tantes* ***Samira*** *et* ***Nouria,*** *mes oncles* ***Hamado*** *et* ***Amine*** *et leurs enfants pour toute l'affection qu'ils m'ont donnée et pour leurs précieux encouragements.*

*A mes âmes sœurs :* ***Chafia, Sara, Yamna.***

*Mes amis proches : Imen, Soumia, Sihem, Nabila, Jiji, Meriem, Dalila, Leila, Saba7, Razika, Naima, Zineb, Radia, Ikram, Nesrin, Assia, Aicha, Mostapha, Saleh el dine, Mohamed*

*A tous les professeurs et enseignants qui m'ont participé à ma collaboré à ma formation depuis mon premier cycle d'étude jusqu'à la fin de mes études universitaires.*

*A tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.*

*Nadia*

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette thèse de master à :*

*A Ma tendre Mère* ***Khadîdja*** *: Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher Père* ***Ahmed*** *: Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*A mes chers frères : Bilel, Nabil. Kamel, Djamel*
*A mes petites sœurs : Naziha, Fethia, Manel, Noura, Nabila*
*A mes chère belle sœurs : Amina et sa fils Abed el moumen, Nadia et sa fils Abed el Djalil.*

*A mes âmes sœurs :* ***Nadia, Meriem.***

*A tous mes professeurs depuis mes premières années d'études: Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*A mon binôme* ***Nadia*** *: Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profond estime, que dieu vous procure bonne santé et long vie.*

*A tous mes très chers amis et mes collègues :*
*Ghalia, Sara, Chafia, Naima, Leila, Sabah, Dalila, Razika, Soumia, Nabila, Meriem, Amina, Samira. Fella, Zineb, Radia, jiji, Sihem, Ahlem Chahrazed, Seddik, Houria, Mohamed, Saleh el dine, Abed el hake.*
*Elles vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie. Et en Souvenir des plus beaux instants qu'on a passé ensemble.*

*Yamena*

## ملخص :

يعرض هذا العمل على تطوير نظام مراقبة شبكة الطرق من خلال شبكة استشعار لاسلكية تستند على كيت eZ430RF2500 من شركة تكساس انسترومنتس.

ويتكون هذا النظام من محطة قاعدة و عقدتين أجهزة استشعار. يتم توصيل كل واحد منهم مع وحدة الموجات فوق الصوتية.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 .



## *Résumé :*

Ce travail présente la mise au point d'un système de surveillance du trafic routier par un réseau de capteurs sans fil à base du 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 capteur à ultrasons. La station de base est reliée à un PC qui récupère les données et affiche les mesures du trafic routier.



***Mots Clés :*** Réseau de capteur sans fil, RCSF, surveillance, trafic routier.



## *Abstract :*

This work presents the development of a traffic monitoring system with a wireless sensor network based on the kit eZ430-RF2500 from Texas Instruments.

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



***Key words:*** monitoring, road traffic, Wireless sensor network, WSN,.

# *Sommaire*

**Liste des figures**.....**i**

**Liste des Tableaux**.....**iii**

**Liste des acronymes** .....**iv**

**Introduction générale** .....**1**

*Chapitre I : Méthodes de mesure des variables de trafic routier*

**I.1. Introduction** .....**3**

**I.2.** Définition du trafic routier .....**3**

**I.3.** Les Différents technologies Surveillance d'un Trafic Routier .....**4**

**I.3.1.** Les capteurs intrusifs .....**5**

**I.3.1.1.** Les capteurs à boucles inductives (électromagnétique) .....**5**

**I.3.1.2.** Les capteurs magnétique .....**6**

**I.3.1.3.** Les capteurs à effet (Piézo-électrique) .....**7**

**I.3.1.4.** Les capteurs à Tubes pneumatiques .....**8**

**I.3.1.5.** Les capteurs Résistifs .....**9**

**I.3.1.6.** Les capteurs à «Fibres optiques».....**10**

**I.3.2.** Les capteurs non intrusifs .....**12**

**I.3.2.1.** Les capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler (Radar).....**12**

**I.3.2.2.** Les capteurs Laser .....**13**

**I.3.2.3.** Les capteurs Vidéo .....**14**

**I.3.2.4.** Les capteurs acoustiques .....**15**

**I.3.2.4.1.** Les capteurs acoustiques passifs (microphone) .....**15**

**I.3.2.4.2.** Les capteurs acoustiques actifs (à Ultrasons) .....**16**

**I.3. 3.** Les capteurs embarqués .....**17**

**I.4. Conclusion**.....**18**

*Chapitre II : Méthodes d'évaluation de trafic routier*

**II.1. Introduction**.....**19**

**II.2.** Les variables du trafic .....**19**

**II.2.1.** Variables individuelles .....**19**

**II.2.1.1.** Notion de trajectoire ..... **19**
**II.2.1.2.** Mesure de x(t) ..... **20**
**II.2.1.3.** Mesure de t(x) ..... **20**
**II.2.1.4.** Variables et caractéristique d'un véhicule ..... **21**
**II.2.1.4.1.** La longueur ..... **21**
**II.2.1.4.2.** La hauteur ..... **21**
**II.2.1.4.3.** Le poids ..... **23**
**II.2.1.4.4.** La position ..... **23**
**II.2.1.4.5.** La vitesse ..... **23**
**II.2.1.4.6.** L'accélération ..... **23**
**II.2.1.4.7.** La trajectoire ..... **23**
**II.2.1.5.** Temps de parcours individuel ..... **23**
**II.2.2.** Variables concernant deux véhicules ..... **24**
**II.2.3.** Variables concernant un flot de véhicules ..... **25**
**II.2.3.1.** Le débit ..... **25**
**II.2.3.2.** La concentration(K) ..... **26**
**II.2.3.3.** Le temps de présence ..... **26**
**II.2.3.4.** Le taux d'occupation ..... **27**
**II.2.3.5.** Temps inter-véhiculaires (TIV) ..... **27**
**II.2.3.6.** Distance inter-véhiculaires (DIV) ..... **27**
**II.2.3.7.** La vitesse individuelle et la longueur des véhicules) ..... **27**
**II.2.4.** Relation entre la vitesse du flot, la concentration et le débit ..... **28**
**II.3.** Analyse du diagramme fondamental ..... **28**
**II.3.1.** Les deux zones du diagramme fondamental ..... **28**
**II.3.2.** Les trois représentations du diagramme fondamental ..... **29**
**II.3.3.** Passage de taux d'occupation à concentration ..... **31**
**II.4. Conclusion** ..... **32**

*Chapitre III : Réalisation du système de mesure trafic routier*

**III.1. Introduction** ..... **33**
**III.2.** Solution adoptée ..... **33**
**III.3.** Module capteur utilisé ..... **34**
**III.3.1.** Caractéristiques ..... **34**
**III.3.2.** Broches de connections ..... **34**

**III.3.3.** Spécifications et limites ..... **34**
**III.3.4.** Fonctionnement ..... **35**
**III.3.5.** Distance de l'objet ..... **35**
**III.4.** Implémentation ..... **35**
**III.4.1.** Présentation du kit eZ430 RF2500 ..... **36**
**III.4.1.1.** Définition ..... **36**
**III.4.1.2.** Caractéristiques eZ430 - RF2500 ..... **36**
**III.4.1.3.** Contenu du kit eZ430 RF2500 ..... **36**
**III.4.2.** Caractéristiques des composants de base ..... **39**
**III.4.3.** Protocole SimpliciTI ..... **39**
**III.5.** Développement du projet sous l'IAR Embedded Workbench pour le MSP430 **40**
**III.5.1.** Création du projet ..... **41**
**III.5.2.** Construction et chargement du projet dans les nœuds « AP » et « ED » sous IAR ..... **42**
**III.6.** Organigrammes des programmes des nœuds AP et ED ..... **42**
**III.6.1.** Organigramme du programme du point d'accès (AP) ..... **43**
**III.6.2.** Organigramme du programme du nœud capteur (ED) ..... **45**
**III.6.2.** Branchement du capteur avec le nœud ..... **48**
**III.7.** Test pratique du système globale de contrôle du trafic routier sur PC ..... **48**
**II.8. Conclusion** ..... **50**
**Conclusion Générale** ..... **51**
**Références bibliographiques** ..... **52**

# *Liste des figures*

**Figure I.1 :** Capteurs au sol Capteurs aériens. ..... **3**

**Figure I.2 :** capteur à boucle électromagnétique ..... **5**

**Figure I.3 :** Variation du champ magnétique par un mobile ..... **6**

**Figure I.4 :** Capteur de Piézo-électrique ..... **7**

**Figure I.5 :** Tubes pneumatiques ..... **8**

**Figure I.6 :** capteurs Résistifs ..... **9**

**Figure I.7 :** Synoptique du capteur piézo-électrique ..... **11**

**Figure I.8 :** RADAR sur la route ..... **12**

**Figure I.9 :** Le radar MESTA 206 ..... **13**

**Figure I.10 :** Les capteurs Vidéos ..... **14**

**Figure I.11 :** Le capteur acoustique passif (microphone) ..... **15**

**Figure I.12 :** Le capteur acoustique actif (à Ultrasons) ..... **16**

**Figure I.13 :** Les capteurs embarqués ..... **18**

**Figure II.1 :** position sur la voie d'un véhicule à quatre instants différents. ..... **19**

**Figure II.2 :** trajectoire d'un véhicule dans le plan (x, t). ..... **20**

**Figure II.3 :** deux trajectoires de véhicules : à gauche (a/) une trajectoire interpolée entre deux mesures de position successives ; à droite (b/) à partir d'une mesure continue de la vitesse et de la position ..... ***21***

**Figure II.4 :** évolution d'un véhicule dont la position est mesurée en des points régulièrement espacés de la voie. ..... **22**

**Figure II.5 :** trajectoires de deux véhicules : un véhicule leader et son véhicule suiveur. ..... **25**

**Figure II.6 :** représentation dans le plan (x, t) de la mesure du débit en un point x et de la concentration à un instant t ..... **26**

**Figure II.7 :** les deux zones de comportement du trafic routier. ..... **29**

**Figure II.8 :** Diagramme du débit (véh/h) en fonction de la concentration (véh/km) **30**

**Figure II.9 :** Diagramme de la vitesse (km/h) en fonction du débit ..... **30**

**Figure II.10 :** Diagramme de la vitesse en fonction de la concentration**.** ..... **31**

**Figure II.11 :** Relation entre le taux d'occupation et la concentration (estimée par le rapport entre débit et vitesse de flot)..... **32**

**Figure III.1 :** Schéma de principe du système réalisé. ..... **33**

**Figure III.2 :** Fonctionnement de capture HC-SR0. ..... **35**

**Figure III.3** *:* Kit du développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments avec un module d'alimentation**.** ..... **36**

**Figure III.4 :** Entrées/sorties du support batterie et du nœud eZ430-RF2500. ..... **37**

**Figure III.5 :** Couches logiques du protocole SimpliciTI. ..... **40**

**Figure III.6 :** Capture d'écran d'IAR ..... **41**

**Figure III.7 :** Capture d'écran du projet réalisé sous l'environnement IAR. ..... **42**

**Figure III.8 :** Organigramme principal du programme de l'AP**.** ..... **44**

**Figure III.9 :** *Organigramme du traitement des trames en attente au niveau de l'AP.* ..... **45**

**Figure III.10 :** Organigramme du programme du nœud capteur (ED). ..... **46**

**Figure III.11 :** Organigramme de la fonction distance. ..... **47**

**Figure III.12 :** Organigramme du sous-programme d'interruption Timer A pour l'émission des nombres de véhicules vers l'AP. ..... **48**

**Figure III.13 :** Schéma de branchement du capteur HC-SR04. ..... **48**

**Figure III.14 :** Emplacement des modules capteurs HC-SR04. ..... **49**

**Figure III.15 :** Résultat de test. ..... **49**

# Liste des Tableaux

Tableau III.1. Spécifications et limites du capteur HC-SR04.....34
Tableau III.2. Désignation des entrées/sorties du support batterie... .....37
Tableau III.3. Entrées/sorties du connecteur d'un nœud eZ430-RF2500... .....42

# *Liste des acronymes*

| | |
|---|---|
| **ADC** | Analog to Digital Converters |
| **AP** | Access Point |
| **BSP** | Board Support Package |
| **CPU** | Central processing unit |
| **DCO** | Digitally Controlled Oscillator |
| **DIV** | Distance Inter Véhiculaire |
| **ED** | End Device |
| **GPRS** | General Packet Radio Service |
| **GPS** | global positioning system |
| **I2C** | Inter Integrated Circuit |
| **ISR** | Interrupt Service Routine |
| **MCK** | l'horloge maîtresse |
| **MCLK** | Master Clock |
| **Mrfi** | Minimal RF Interface |
| **PC** | Program Counter |
| **RCSF** | Réseau de Capteurs Sans Fil |
| **RF** | Radio frequency |
| **SIREDO** | Système Informatisé de Recueil de Données |
| **SMCLK** | Sub-main clock |
| **SPI** | Serial Peripheral Interface |
| **TIV** | Temps Inter-Véhiculaire |
| **TO** | Taux d'ocuupation |
| **USB** | Universal Serial Bus |
| **UART** | Universal Asynchronous Receiver Transmitter |
| **UTCS** | Urban traffic control software |
| **WSN** | Wireless Sensor Network |

# *Introduction Générale*

De nos jours, se déplacer est devenu un aspect essentiel de la vie quotidienne : qu'il s'agisse de transports en commun ou de véhicules personnels, le vaste réseau formé de ces moyens de locomotion est immensément complexe à gérer. 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. **[8]**

Dans notre mémoire, nous nous attardons sur le cas du trafic routier urbain et effectuons un état de l'art de son contrôle par un réseau fixe de capteurs sans fil. Notons que le cas de réseaux mobiles ne sera que faiblement abordé car représente un aspect particulier, sélectif et parfois utopique des systèmes distribués.

L'objectif principal de notre mémoire est de présenter la surveillance du trafic routier en utilisant les réseaux fixes de capteurs sans fil et en présentant des outils permettant de simuler le contrôle du trafic routier urbain.

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

Le rôle de chaque capteur est de récolter un ensemble de données dans son environnement, et le transmettre de proche en proche jusqu'à atteindre généralement une station de base, qui peut jouer le rôle de coordinatrice du réseau et communiquer vers l'extérieur les données importantes recueillies. **[8]**

L'utilisation de tels réseaux est répandue dans de nombreux domaines et applications : nous pouvons par exemple citer la surveillance de forêts, d'infrastructures critiques, ou encore la détection d'agents biochimiques dans le secteur militaire.

L'application des technologies de l'information et de la communication au domaine des transports peut être vu de différentes manières. La plupart de ces dernières sont dites réactives car permettent de recueillir des données propres à la circulation routière afin de la surveiller ou même tenter de la contrôler.

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 **[5]**.

Ce manuscrit est constitué de 3 chapitres et organisé de la manière suivante:

- ✓ Dans le premier chapitre nous commençons par la présentation des différentes méthodes de mesure des variables de trafic.
- ✓ Dans le deuxième chapitre nous présentons les moyens d'évaluations du trafic routier.
- ✓ le troisième chapitre et le dernier sera consacré à la réalisation du système de surveillance du trafic routier basé sur le kit Ez430-RF2500.

Enfin nous terminons par une conclusion.

# CHAPITRE1:
# Méthode de mesure des variables de trafic routier

CHAPITRE 1

## I. 1.Introduction

Les variables caractérisant le trafic routier sont nombreuses. Les configurations et les géométries de chaussées sont également déterminantes dans le choix d'un système de recueil de données de trafic. Ce chapitre se propose de présenter de manière synthétique les différentes méthodes de mesure des variables de trafic routier.

Une attention particulière est portée sur les principes de fonctionnement, sur l'intrus vite des capteurs et sur la description des mesures disponibles, associées aux limites de fonctionnement pour chaque technologie (mesure).

## 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.

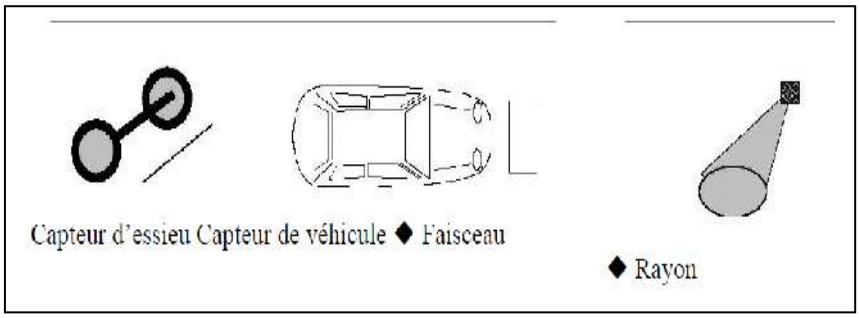



**Figure I.1.** *Capteurs au sol Capteurs aériens.*

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. **[1]**

## I.3. Les Différents technologies Surveillance d'un Trafic Routier

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.

Les technologies principales de recueil de données de trafic Classée en trois catégories de capteurs :

- **Les capteurs intrusifs** : lorsqu'ils sont poses en chaussée.
- **Les capteurs non intrusifs** : lorsqu'ils ne nécessitent pas un travail sur la chaussée.
- **Les capteurs embarqués** : capteurs à l'intérieur du véhicule. **[3]**

### I.3.1. Les capteurs intrusifs

#### *I.3.1.1. Les capteurs à boucles inductives (électromagnétique)*

Ce capteur intrusif est compose d'une ou de plusieurs boucles inductives dont la forme la plus répandue en Europe est le rectangle ainsi que d'une queue de boucle. Chaque boucle est constituée de plusieurs spires (3 pour le standard SIREDO) de fil de cuivre

multibrins étame d'une section de l'ordre de 1 à 2 mm2 (1,34mm2 pour le standard SIREDO). Le fil utilise présente un revêtement PVC hautement isolant. Suivant la forme de la boucle, ses dimensions, le nombre de spires, sa profondeur d'enfouissement et la section du fil utilise, les résultats des détections seront différents. La queue de boucle est la portion de la paire de fils située entre l'extrémité de la boucle et l'unité de détection. Cette paire de fils est torsadée et blindée à raison de 10 spires aux mètres pour éviter les champs magnétiques perturbant.



**Figure I.2**. *Capteur à boucle électromagnétique*

La boucle est placée en chaussée a 7cm (standard SIREDO) en dessous de l'enrobe ou du rez de la dalle béton. Un signal électrique sinusoïdal de quelques dizaines de mV est applique aux bornes de la boucle électromagnétique à une fréquence entre 50 et 150kHz. Cette tension induit un champ magnétique rayonnant autour la boucle et au-dessus de la chausse (circuit résonnant).

A chaque passage d'un véhicule au-dessus de la boucle, la masse métallique en mouvement du véhicule perturbe les champs magnétiques rayonnant, ce qui a pour effet de modifier le courant induit de la boucle et donc la fréquence du signal électrique émis. Ce décalage de fréquences est convertit en tension a l'aide d'une boucle a verrouillage de phase. Cette dernière est souillée pour fournir un signal « tout ou rien» directement lie a la présence du véhicule. A l'aide de deux boucles inductives, il est possible de déduire la vitesse du véhicule ainsi que sa longueur. Des boucles plus étroites permettent de déduire la silhouette de chaque véhicule en détectant leurs essieux. **[4]**

### *I.3.1.2. Les capteurs magnétique*

Ce capteur intrusif intègre de très petites selfs pouvant être réalisées sur des circuits imprimés de très petite taille. Il fonctionne grâce à une analyse de la variation du champ magnétique terrestre causée par le passage des véhicules (comme une boussole)

Le signal délivre par le capteur est un signal électrique proportionnel aux variations du champ magnétique terrestre sur les 3 axes **x**, **y** et **z**. Une de ses particularités réside donc dans sa petite taille (quelques centimètres). De forme cylindrique en général, il est souvent pose en chaussée via un petit carottage a quelques centimètres en dessous de l'enrobe. Un seul capteur pose en milieu de voie permet de détecter la présence d'un véhicule. Tout comme pour les boucles inductives, plusieurs capteurs poses à plusieurs mètres d'intervalle sur le profil en long de la chaussée permettent de déduire d'autres natures de mesure (vitesses, etc.).

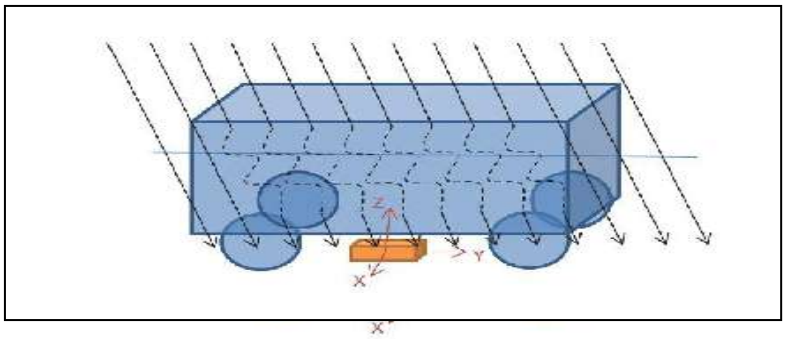


**Figure I.3.** *Variation du champ magnétique par un mobile.*

Plusieurs capteurs poses suivant le profil en travers de la chaussée permettent de mesurer une « signature magnétique » de chaque véhicule. La liaison de ce type de capteur avec son point de collecte est réalisée en général en mode « sans fil » à l'aide d'une liaison radio très basse consommation. Par ailleurs, les mesures des magnétomètres sont également influencées par la température de chaussée. Cette influence est prise en compte dans le traitement des signaux électromagnétiques. **[4]**

### *I.3.1.3. Les capteurs à effet (Piézo-électrique)*

Ces capteurs intrusifs présentent la propriété physique qu'ont certains matériaux diélectriques de générer une tension sous l'effet d'un déplacement de charges électriques lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique. Cette tension électrique U est proportionnelle à la pression exercée sur le capteur (force que nous appellerons pression P par

la suite). Trois types de capteurs sont utilisées aujourd'hui pour cette technologie : les capteurs céramiques, les capteurs quartz et les capteurs polymères.

Le capteur piézo-électrique a base de céramique est très utilise aujourd'hui dans le domaine du trafic routier. Ce capteur est conditionne sous la forme d'un câble coaxial comportant une gaine et une âme conductrice en cuivre. Ce câble est insère de manière transverse dans la chaussée, il est enrobe dans un barreau de résine pour qu'il conserve sa rigidité, la tension électrique créée dans la céramique lorsque la force d'impact des pneus d'un véhicule lui est appliquée est mesurée entre l'âme et la gaine. L'effet piézo-électrique est observable également sur des matériaux autres que la céramique, et notamment sur les polymères à l'aide de films de matière plastique à haute résistivité et le quartz qui possède cette propriété naturelle. **[4]**

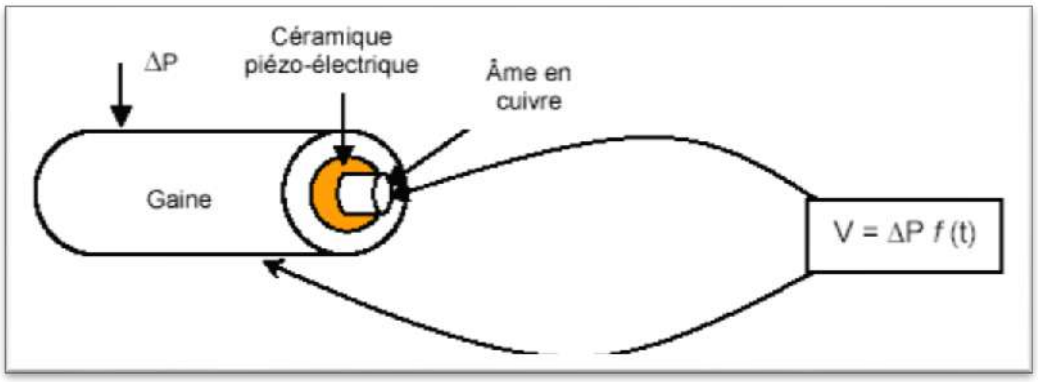



**Figure I.4.** *Capteur de Piézo-électrique*

### *I.3.1.4. Les capteurs à Tubes pneumatiques*

Il s'agit de capteurs faiblement intrusifs. Les capteurs à tubes pneumatiques sont utilisés exclusivement dans le cadre de recueils de données de trafic temporaires. Ces capteurs se présentent, pour les plus courants, sous la forme de tubes pneumatiques en caoutchouc noir d'un diamètre intérieur de 6mm pour un diamètre extérieur de **15mm**. Plusieurs dimensions et types de tubes sont proposés par les fabricants : **6x12mm**, **6x13mm**, **6x15mm**, **6x18mm**, en format rond, demi-rond ou encore ronds avec une partie centrale neutralisée pour éviter les interventions de fixation de colliers entre deux chaussées.

Les tuyaux sont attaches a l'aide de collier et de tire-fond sur la chaussée dans l'enrobe. Le principe de fonctionnement est simple, les tuyaux transmettent des variations de pression d'air, provoquées par le passage des essieux des véhicules, vers des vannes ou détecteurs pneumatiques qui transforment ces variations de pression en signaux électriques. Ceux-ci sont orientes vers le circuit d'entrée du compteur électropneumatique qui va les filtrer, les dater et les comptabiliser. Chaque compteur peut être relie a 1 ou 2 tubes qui vont permettre de recueillir : le nombre essieux avec 1 seul tube, le nombre de véhicules, les vitesses et la distinction VL/PL avec deux tubes espaces de 1 mètre. Tout véhicule présentant une distance inter-essieux de plus de 3,45 m sera considère en PL.



**Figure I.5.** *Tubes pneumatiques*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Débits, vitesses et distinction VL/PL (deux classes).

Les tubes pneumatiques sont sensibles à l'arrachage si leur installation est d'une durée importante (plus de 2 mois). Ils ne sont pas recommandes pour les routes a chaussées séparées et pour les axes présentant un trafic journalier tous véhicules supérieur à 10 000 v/j. **[4]**

### *I.3.1.5. Les capteurs Résistifs*

Ces capteurs intrusifs sont bases sur le principe de la variation d'une mesure de résistivité électrique. Une pression exercée sur deux surfaces conductrices séparées par un composant diélectrique élastique provoque un rapprochement voire un contact

Faisant varier la résistivité. L'application la plus connue est le tapis détecteur de piétons utilise dans de nombreux domaines. Dans le domaine de l'exploitation de trafic, il trouve son usage en milieu urbain :

• Sur les passages piétons implantes en section courante et non équipes de feux ;
• Sur les carrefours équipes de feux, pour l'adaptation du « temps de vert piéton ».




**Figure I.6.** *Capteurs Résistifs*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Détection de piétons, temps de présence. **[4]**

### *I.3.1.6. Les capteurs à «Fibres optiques»*

Les capteurs a fibre optique sont définis selon la norme NF C 93-800 (1991) : « Un capteur a fibre optique est un dispositif comprenant une ou plusieurs fibres, permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observes et/ou des ondes lumineuses circulant dans la (ou les) fibre(s) ».

Deux qualifications s'emploient :

- ❖ intrinsèque : lorsque la fibre est le transducteur ;
- ❖ extrinsèque : lorsque l'élément transducteur n'est pas sur la fibre optique.

Une gaine mécanique est rajoutée à la fibre afin de la protéger. Cela permet de créer le mesurande par contrainte à chaque passage de véhicule.

Afin de récupérer l'information, soit nous à une transmission (i.e. La fibre traverse la route et le détecteur est à l'autre bout de la fibre) soit par réflexion (une source émet un signal lumineux dans la fibre optique de transmission. Ce signal traverse le Capteur a fibre optique qui réfléchit ou rétrodiffuse ce signal) avec une source et un détecteur cote a cote.

Différentes techniques de modulation permettent de faire varier l'onde lumineuse selon le capteur :

- modulation d'intensité : variation du signal lumineux ou fonctionnement en tout ou rien.
- modulation de phase : variation de la phase du signal lumineux.
- modulation de polarisation : polarisation de l'onde.
- modulation de fréquence, de temps : changement de la fréquence de l'onde.

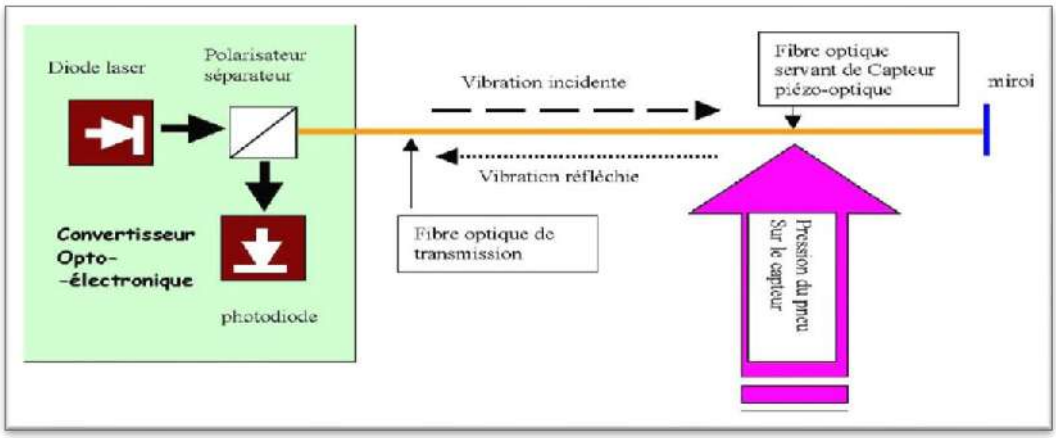



**Figure I.7.** *Synoptique du capteur piézo-électrique*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Débits, vitesses, longueurs et formes de véhicules, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire, distance capteur/véhicule.

**Avantage :**

- ❖ une insensibilité aux perturbations électromagnétiques ;
- ❖ une isolation électrique entrainant une plus grande sécurité dans son fonctionnement et dans son installation ;
- ❖ un temps de réponse rapide ;
- ❖ un poids faible par rapport au cuivre notamment ;

- une large plage de mesures possibles ;
- une mesure pouvant être sans contact et sur une longue distance ;
- une absence d'alimentation au point de mesure.
- faible perte de signal
- communication bidirectionnelle.

**Inconvénients:**

- pertes engendrées par la courbure de la fibre
- fragilité et cout des connecteurs
- mesures par contact. **[4]**

### *I.3.2. Les capteurs non-intrusifs*

#### *1.3.2.1. Les capteurs hyperfréquences utilisant l'effet Doppler (Radar)*

Système non-intrusif installe en accotement de chaussée, sur mat, ou portique. Un train d'ondes électromagnétiques pulsées est émis à une fréquence de l'ordre de 10 et 25GHz par une antenne radar en direction d'un véhicule. Au contact du véhicule, l'onde est réfléchie et renvoyée modifiée vers le capteur.

L'onde renvoyée par le véhicule permet de calculer la vitesse à partir du décalage de fréquence entre le signal émis et reçu. La forme et l'amplitude du signal reçu sont directement liées à la forme du véhicule et à sa surface de réflexion. La valeur de la SER (Surface Equivalente Radar exprimée en m2) analysée permet de distinguer la silhouette des véhicules (VL/PL).

Le capteur peut aussi estimer la longueur du véhicule. Pour analyser le trafic sur plusieurs voies simultanément, il est nécessaire de choisir un matériel disposant de plusieurs « canaux » radars (à raison d'un canal utile par voie).

La distance de détection d'un véhicule est variable selon le matériel ; des distances comprises entre 50m et 150m sont généralement proposées par les constructeurs.

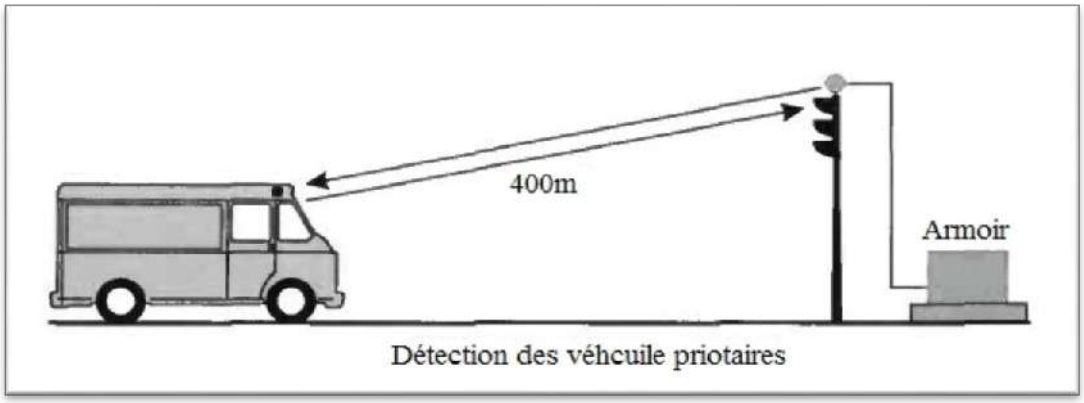



**Figure I.8.** *RADAR sur la route*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Débit, vitesse, débit classifies (VL/PL) la classification est faite à partir de la longueur ou du SER.

Facteurs perturbant les détections : véhicules circulant à basse vitesse (inferieure a 20km/h), véhicules très proches les uns des autres, véhicules en forte accélération ou décélération, très petit gabarit de véhicules. **[4]**

### *1.3.2.2. Les capteurs Laser*

Un Laser est appareil émettant un rayonnement lumineux puissant non visible, amplifie par une « émission stimulée » à l'aide de deux miroirs partiellement et totalement réfléchissant. Une des particularités du Laser est sa pureté spectrale et la possibilité d'obtenir une émission autour d'une seule longueur d'onde. Les Lasers sont classes en six familles pour de nombreux domaines d'application mais les capteurs Laser appliques a la détection de véhicules peuvent être classes en trois classes : les Lasers a balayage, les Lasers mono-point a faisceau conique ponctuel et les Lasers a faisceau asymétrique.

Ces capteurs permettent de réaliser de la détection de véhicules, de la mesure de distance capteur/véhicules, de la mesure de vitesse et de l'analyse de longueurs et de formes de véhicules. Tous les compteurs / analyseurs de trafic Laser sont non intrusifs, ils peuvent selon l'utilisation être installes en accotement : sur le sol, sur mats ou en surplomb de voies de circulation : sur potences, portiques ou ouvrages d'art. Il convient par mesure de sécurité de choisir des produits « sans danger oculaire» a base de Laser de Classe1/1M.



**Figure I.9.** *Le radar MESTA 206*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Débits, vitesses, longueurs et formes de véhicules, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire, distance capteur/véhicule.

Les Lasers a balayage ou 1D ont une vitesse d'analyse limitée (< 1kHz) qui bornent leurs précisions pour les véhicules « rapides », les Lasers mono-point sont très sensibles a la pluie et leurs faisceau « étroit » ne permet pas de détecter tous les
Véhicules (moto par exemple), les Lasers a faisceau asymétrique constituent un moyen de détection plus fiable et plus précis. **[4]**

### *1.3.2.3. 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 pour 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 et à la détection automatique d'incidents. **[1]**




**Figure I.10.** *Les capteurs Vidéos*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs selon les matériels : débit tous véhicules, débits VL/PL, taux d'occupation, temps inter-véhiculaire, distance inter-véhiculaire et vitesse, par sens et par voie.

Sensibilité aux conditions météorologiques (pluie, neige), aux illuminations fortes (soleil rasant) ou changeantes. Aux masquages et occlusions (végétation, véhicules de grands gabarits), aux flous de bouge (occasionne par le support). Résultats dépendant de l'implantation, en bord de voie, terreplein central ou en surplomb. Nécessite de maintenance : Nettoyage de la vitre du caisson de caméra. Dans le cas des PL, il n'y a pas de distinction entre un camion et un autocar. Il n'est également pas possible, à ce jour, de déterminer la catégorie de PL et/ou de compter le nombre d'essieux. **[4]**

### *1.3.2.4. Les capteurs acoustiques*

#### *1.3.2.4.1. Les capteurs acoustiques passifs (microphone)*

Ces capteurs détectent les bruits de roulement et / ou de moteur émis par les véhicules. Ces capteurs sont donc peu directifs, et ne peuvent servir que pour détecter la présence ou l'absence de véhicules sur une certaine zone de la chaussée. Il est possible d'avoir une mesure précise, par voie en utilisant un faisceau de capteurs situe à intervalles réguliers en bord de route et associées à un dispositif de traitement de signal relativement complexe.

En conséquence, ce type de capteurs est peu utilise dans l'exploitation courante du trafic. Leur utilisation est préférable en trafic fluide car les congestions créent une pollution sonore trop importante pour permettre une détection précise des véhicules. La classification VL/PL se fait par le volume sonore et l'analyse de la fréquence propre du véhicule.

Certains capteurs de ce type sont utilisés en complément de la vidéo pour pallier les baisses de performances de nuit de ces derniers.

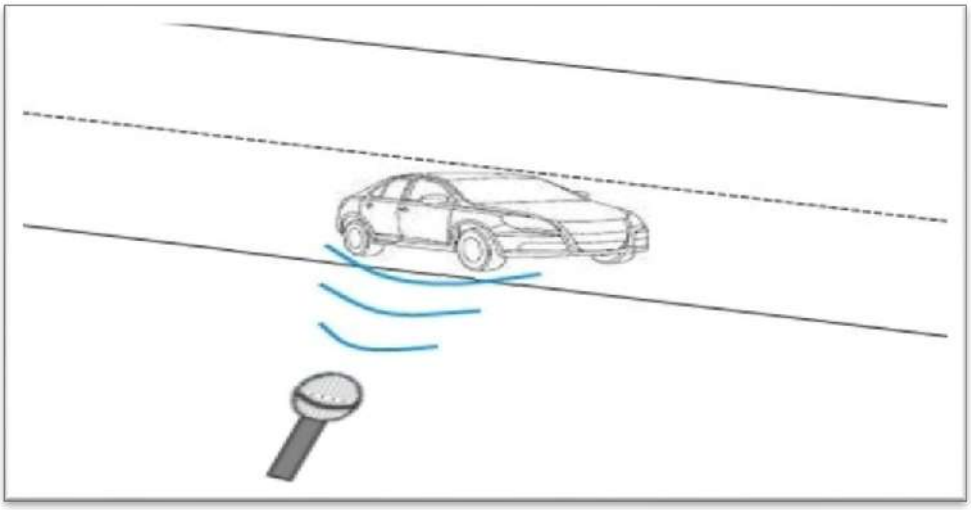


**Figure I.11.** *Le capteur acoustique passif (microphone)*

Les mesures disponibles de ce type de capteurs : Débit tous véhicules, débits VL/PL selon les matériels et vitesse. Le séquencement des mesures recueillies dépend du module de traitement électronique couple au compteur.

Fonctionne en trafic fluide, baisse de performance en congestion. Pas de mesure de vitesse. Uniquement de la présence de véhicule. **[4]**

### *1.3.2.4.2. Les capteurs acoustiques actifs (à Ultrasons)*

Ces capteurs sont constitués de couples émetteurs / récepteurs a ultrasons (US) fonctionnant aux environs de 60 kHz, et places au-dessus de la chaussée. L'émetteur envoie périodiquement un signal impulsionnel en direction de la chaussée. Ce signal est réfléchi par les véhicules ou par la chaussée vers le récepteur. Ainsi, l'analyse du temps de parcours entre l'émission et la réception permet de détecter la présence ou le passage d'un véhicule. Associe a un analyseur, il est alors possible de représenter la forme du véhicule ou plus exactement le profil en long de ce dernier (par échantillonnage de point) et par le même de déterminer sa longueur. L'avantage de ce capteur est d'être non intrusif et d'avoir de bonnes performances, spécialement en congestion. Ils sont couramment utilisés au Japon.

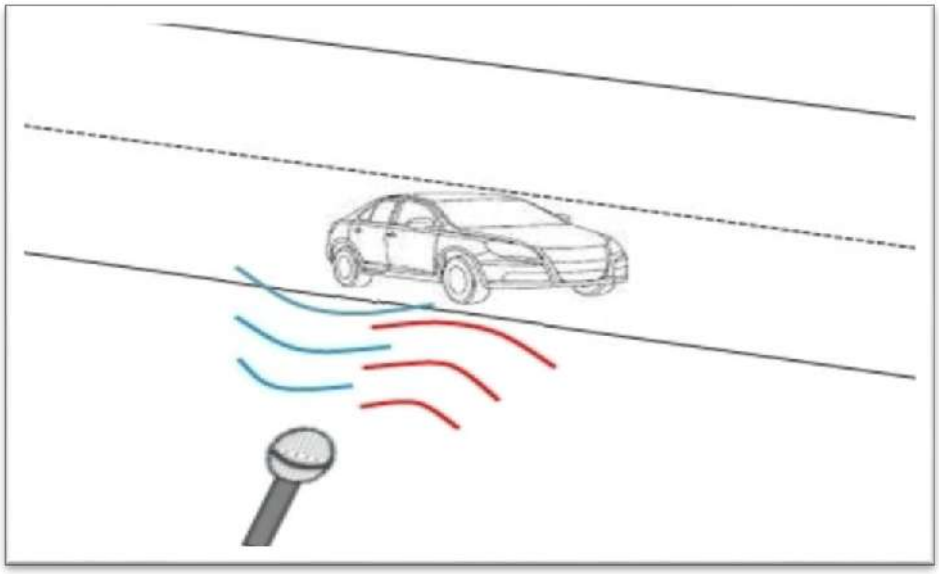


**Figure I.12.** *Le capteur acoustique actif (à Ultrasons)*

**Principe de fonctionnement**

L'émetteur et le récepteur sont situés dans le même boîtier.

L'émetteur envoie un **train d'ondes** qui va se réfléchir sur l'objet à détecter et ensuite revenir à la source. Le temps mis pour parcourir un aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet par rapport à la source. Plus l'objet sera loin plus il faudra longtemps pour que le signal revienne.

Pour détecter le niveau (la distance d), on utilise l'équation :

$$\boxed{v = \frac{d}{t}} \qquad \text{donc} \qquad \boxed{d = v \cdot t}, \tag{I.1}$$

Les mesures disponibles de ce type de capteurs sont : Débits, vitesses, longueurs et formes de véhicules, temps de présence, taux d'occupation, temps et distance inter-véhiculaire, distance capteur/véhicule.

Faibles précisions de la vitesse et du taux d'occupation. Non robuste aux conditions météo (brouillard et pluie) qui altèrent le fonctionnement et la précision. Ne fonctionne qu'en surplomb, nécessite un capteur par voie. **[4]**

### I.3.3. Les capteurs embarqués

Ces capteurs mesurent des grandeurs ou des paramètres a bord des véhicules. Ce sont ces capteurs qui instrumentent les « véhicules traceurs ». Ils permettent de fournir des données de position ou de trajectoire et des données de vitesse. Ces données sont issues, soit de capteurs installes spécifiquement à l'intérieur ou à l'extérieur, soit de données du constructeur automobile qui transitent par le micro réseau du véhicule (Bus CAN).

Les mesures peuvent être stockées dans un fichier informatique pour une analyse a posteriori ou bien envoyées en temps réel via un support de communication sans fils (GPRS ou 3G). Ces moyens peuvent être mis en œuvre pour évaluer finement des temps de parcours, estimer des profils de vitesse sur un itinéraire, ou encore renseigner les OD d'une flotte de véhicules...

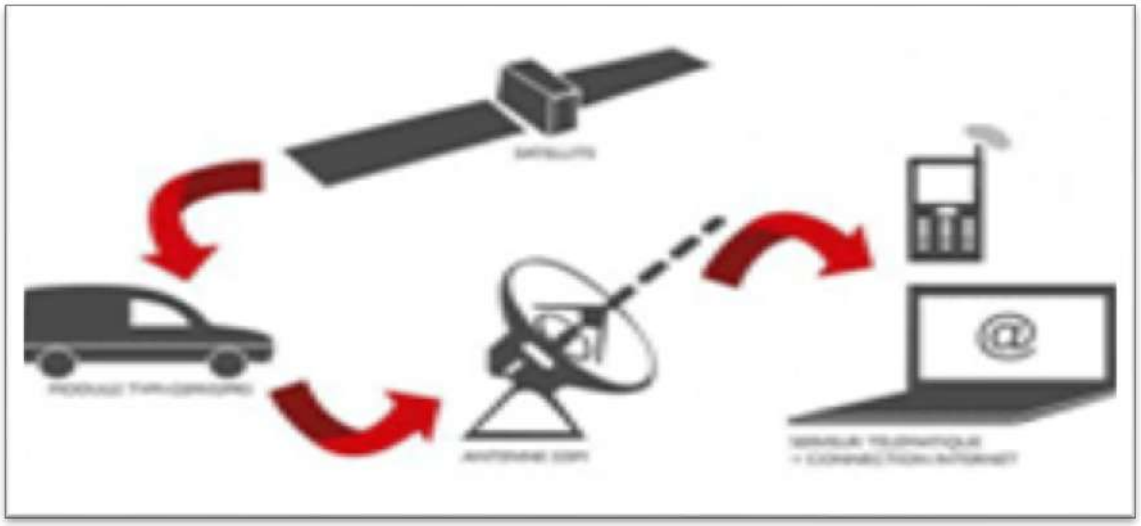


**Figure I.13**. *Les capteurs embarqués*

Les capteurs de position et/ou trajectoire : GPS, centrales inertielles, optiques et vidéo, télémétriques, odomètres. Les capteurs de vitesse : optiques (Correvit), GPS, Bus CAN du véhicule.

Les capteurs embarques doivent être robustes, ils doivent fonctionner malgré les vibrations, la sollicitation dynamique du véhicule et un environnement avec des brusques variabilités (luminosité, météo, canyon urbain...). La fréquence d'échantillonnage des capteurs est l'élément limitant pour la fourniture de donnée de qualité, le minimum se situant autour des 25 Hz. En dessous de cette valeur, comme en particulier les GPS a 1 Hz, les capteurs

donnent des résultats peu précis des que les variations de vitesse ou de trajectoire sont importantes. **[4]**

## I.4. 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 les différents types de capteurs permettant la mesure directe ou indirecte des variables de circulation.

Nous essayerons dans le chapitre suivant, les méthodes d'évaluation du trafic routier.

# CHAPITRE 2:
# Méthode d'évaluation de trafic routier

CHAPITRE 2

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les variables du trafic accessibles par la mesure. Nous avons commencé par les variables individuelles, même si elles sont rarement accessibles dans la réalité, car c'est à partir de celles-ci que sont construites les variables collectives qui sont, elles, très souvent disponibles.

Nous proposons ici un certain nombre d'outils simples issus de la théorie du trafic qui permettent de quantifier le trafic routier et de comprendre les principaux mécanismes à la base de l'apparition de la congestion.

## II.2. Les variables du trafic

Il existe plusieurs variables qui caractéristiques le trafic routier parmi lesquels nous avons cité :

### *II.2.1. Variables individuelles*

#### *II.2.1.1.Notion de trajectoire*

Pour étudier le trafic, nous pouvons s'intéresser à un véhicule choisi parmi les autres. Supposons que toutes les dix secondes nous puisons mesurer sa position avec une précision suffisante (par exemple grâce à un système de type GPS embarqué), nous pourrons alors schématiser l'évolution du véhicule sur la voie par la figure ci-dessous

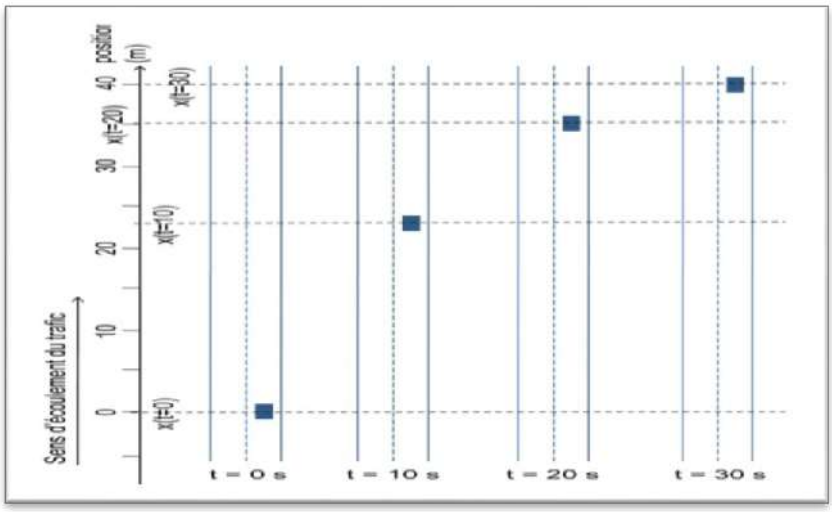



**Figure II.1.** *Position sur la voie d'un véhicule à quatre instants différents*.

Nous avons repéré la position longitudinale **x(t)** à **t= 0, 10, 20** et **30** secondes. Ce véhicule a parcouru **40** mètres en **30** secondes, ce qui correspond à une vitesse d'un peu moins de **50 Km/h**. Ce véhicule reste au centre de la voie de droite, sa position latérale **y(t)** n'est donc pas modifiée au cours de son trajet.

La trajectoire d'un véhicule est donc l'ensemble des points successifs de l'espace qu'il occupe accompagné des instants **t** de passage en ces points. Chaque point de la trajectoire peut donc être repéré dans un espace à quatre dimensions : **(x, y, z ; t)** Cependant nous utilisons plus généralement une abscisse curviligne : **x** est la position longitudinale, **y** la position latérale et on néglige la hauteur. **[2]**

### *II.2.1.2. Mesures de x(t)*

Nous avons coutume de s'intéresser uniquement à la position longitudinale **x(t)** par rapport à la voie. Ceci est lié à l'appareil de mesure qui, historiquement, est un capteur de tours de roues. Nous résumons donc la voie à une droite, le long de laquelle on mesure la position. Nous parlons donc couramment de trajectoire dans un plan **(x, t).** Nous pouvons représenter ces mesures sur la figure suivante. Remarquons au passage que le véhicule étudié est resté immobile entre les instants **t= 22 s** et **t= 24 s**. nous pouvons déduire de l'information de cette figure la distance parcourue (environ 3 mètres) par le véhicule pendant une seconde entre **t= 4 s** et **t=5 s** par exemple.

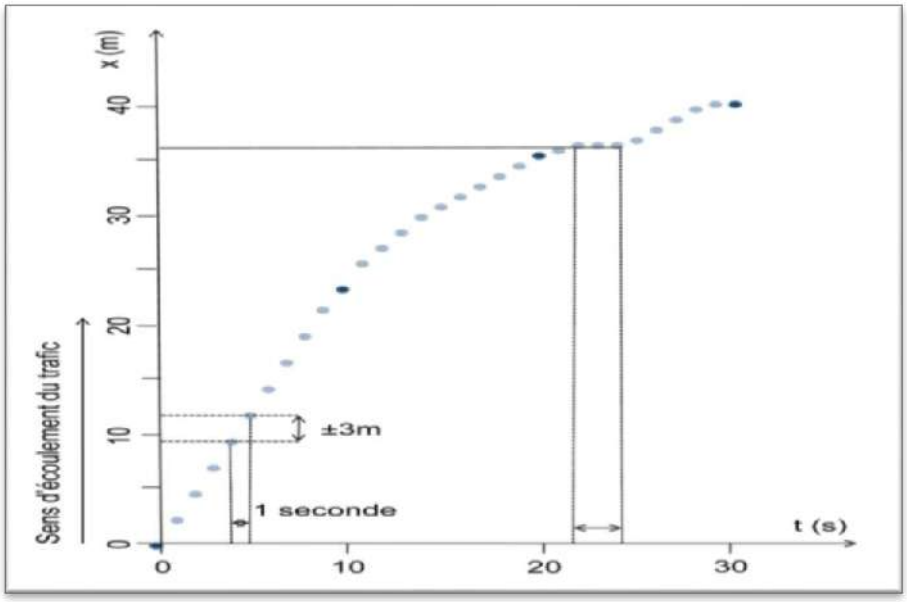



**Figure II.2.** *Trajectoire d'un véhicule dans le plan (x, t).*

À partir de cette mesure de la position à chaque seconde, nous pouvons dessiner une trajectoire entre les points mesurés **x = x(t).** Ceci est montré sur la figure suivante (partie a). La pente de la droite séparant deux mesures successives de la position est une mesure indirecte de la vitesse individuelle du véhicule à partir de sa position. Si nous disposons d'une mesure directe de la vitesse individuelle, nous pouvons tracer une trajectoire individuelle plus réaliste, par exemple celle de la figure suivante (partie b). Notons d'ailleurs au passage qu'en toute rigueur mathématique il faudrait disposer d'une mesure de la position en continu. **[2]**

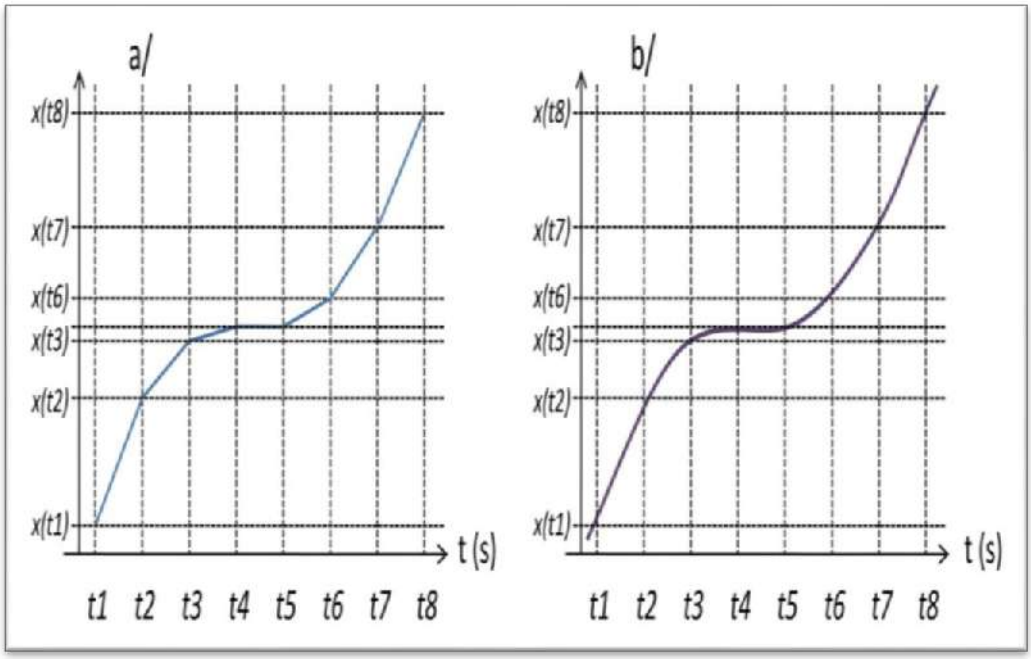



**Figure II.3**. *Deux trajectoires de véhicules : à gauche (a/) une trajectoire interpolée entre deux mesures de position successives ; à droite (b/) à partir d'une mesure continue de la vitesse et de la position.*

### *II.2.1.3. Mesures de t(x)*

Si, au lieu de disposer d'une mesure embarquée de la position du véhicule à chaque pas de temps, nous plaçons le long de la route des observateurs régulièrement espacés, chargés de mesurer les dates de passage du véhicule qui nous intéresse, nous associerons les instants aux points de mesure. Ceci est représenté sur la figure suivante.

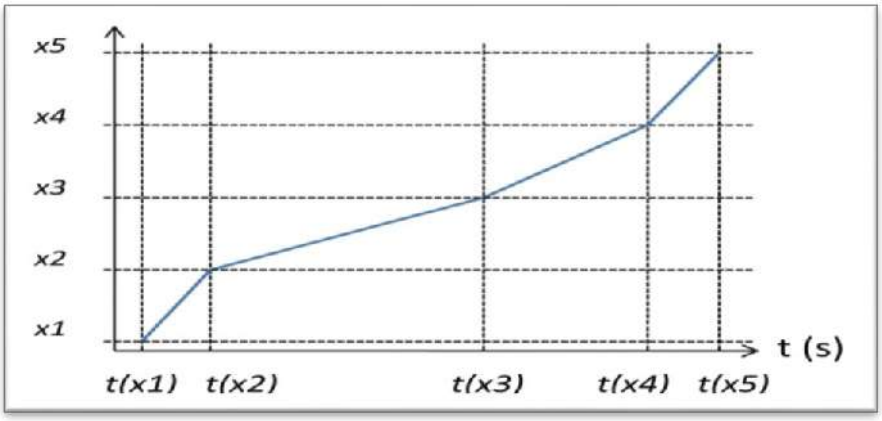



**Figure II.4.** *Évolution d'un véhicule dont la position est mesurée en des points régulièrement espacés de la voie.*

Ces deux méthodes de mesure (de la position du véhicule à plusieurs instants successifs ou de la date de passage en plusieurs points régulièrement espacés d'une route) permettent de mesurer le même phénomène (la progression d'un véhicule sur une route) de deux manières complémentaires. **[2]**

### *II.2.1.4. Variables et caractéristiques d'un véhicule*

Les caractéristiques d'un véhicule peuvent être appréciées à partir des mesures suivantes :

#### *II.2.1.4.1. La longueur*

Permet généralement de distinguer les véhicules légers et des véhicules lourds. Communément on considère que les légers ont une longueur inférieur à 7 m alors que la longueur des poids lourds est supérieures à 7m **[3].**

#### *II.2.1.4.2. La hauteur*

Elle devient un élément Important notamment pour le dimensionnement de nouveaux ouvrages. La mesure de la hauteur des véhicules est utilisée dans deux types de situations :

- pour réaliser une analyse statistique des véhicules circulant sur une infrastructure donnée afin d'optimiser le dimensionnement d'un ouvrage à gabarit réduit (tunnel par exemple). Ce type de mesure présente un caractère méthodologique qui sera abordé dans le chapitre concernant les mesures de positionnement latéral,
- pour alerter en temps réel les usagers, en amont d'un ouvrage à gabarit réduit.

### *II.2.1.4.3. Le poids*

Il est largement démontré que la dégradation des chaussées est accélérée par le passage des essieux lourds et plus particulièrement par les essieux dépassant le poids maximal autorisé. Aussi toute tentative de rationalisation de l'utilisation des crédits consacrés à l'entretien passe par une meilleure connaissance de la fatigue supportée par la chaussée. Une évaluation de cette fatigue est donnée par le calcul de l'agressivité **[3].**

### *II.2.1.4.4. La position*

La position d'un véhicule mesurée à un instant est notée **x(t). [2]**

### *II.2.1.4.5. La vitesse*

La vitesse d'un véhicule est la dérivée de la position par rapport au temps : **[2]**

$$V(t) = \dot{x}(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad \textbf{(II.1)}$$

### *II.2.1.4.6. L'accélération*

L'accélération est la dérivée de la vitesse d'un véhicule par rapport au temps et donc la dérivée seconde de la position par rapport au temps : **[2]**

$$a(t) = \ddot{x}(t) = \frac{d^2x(t)}{dt^2} = \frac{dV(t)}{dt} \quad \textbf{(II.2)}$$

### *II.2.1.4.7. La trajectoire*

La trajectoire d'un véhicule est l'ensemble des points associés à la date de passage d'un véhicule. Elle peut être représentée dans un plan **(x, t),** soit à partir de mesures à chaque pas de temps de la position, soit à partir de mesures des instants de passage en des points régulièrement espacés de la route. **[2]**

### *II.2.1.5. Temps de parcours individuel*

Le temps de parcours individuel est la mesure du temps passé par un véhicule pour aller d'un point **A** à un point **B**. C'est donc l'écart entre la date d'entrée sur le tronçon **(A)** et la date de sortie du tronçon **(B).** Il est connu à l'instant **t=T $_{\text{passage}}$(B)** où le véhicule passe au point *B* de sortie :

$$Tp_{A\to B}(t) = T_{passage}(B) - T_{passage}(A) \quad \textbf{(II.3)}$$

Du temps de parcours individuel entre deux points, on peut déduire la vitesse moyenne individuelle sur ce tronçon ($L_{A\to B}$ étant la distance entre l'entrée et la sortie du tronçon) : **[2]**

$$V_{A\to B}(t) = {}^{L_{A\to B}}/_{Tp_{A\to B}(t)} \quad \textbf{(II.4)}$$

### *II.2.2. Variables concernant deux véhicules*

Lorsqu'un véhicule suit un autre véhicule, nous parlons de véhicule suiveur et de véhicule leader ou de véhicule suivi. Nous pouvons les observer également de deux manières complémentaires l'une de l'autre :

- **en un instant *t* :** dans ce cas, nous mesurons la distance entre ces deux véhicules. Ici peut intervenir la longueur du véhicule. Ceci conduit :
  - ✓ soit à l'*espacement* ou à la *distance inter-véhiculaire* (qui est la distance entre deux avants ou arrières de véhicules et qui se dit en anglais « *spacing* »),
  - ✓ *soit* au *créneau* (en anglais : « *space gap* »), qui est la distance séparant l'arrière d'un véhicule de l'avant du véhicule qui le suit ;
- **en un point *x* :** dans ce cas, nous mesurons le temps séparant les passages de deux véhicules successifs.

De la même manière nous pouvons mesurer :

- ✓ le temps séparant le passage de l'avant ou de l'arrière de deux véhicules successifs : le temps inter-véhiculaire,
- ✓ ou le temps séparant le passage de l'arrière d'un véhicule du passage de l'avant du véhicule suivant. Ce dernier est appelé *intervalle*, *créneau temporel* ou « *time gap* » en anglais.

Ces notions sont illustrées sur la figure suivante :

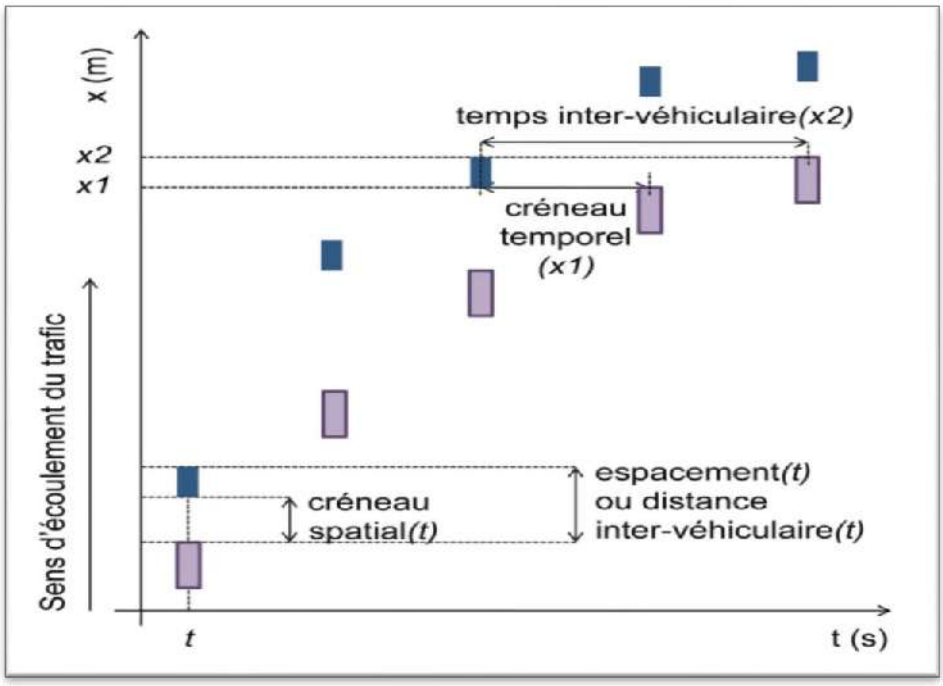



**Figure II.5**. *Trajectoires de deux véhicules : un véhicule leader et son véhicule suiveur.*

Nous avons représenté le créneau temporel (temps qui sépare le passage de l'arrière du leader de l'avant du suiveur en un point) et le temps inter-véhiculaire ; le créneau spatial et la distance inter-véhiculaire. **[2]**

### *II.2.3. Variables concernant un flot de véhicules*

Dans la suite nous ne considérerons qu'un sens d'écoulement. Un flot de véhicules est l'ensemble des véhicules parcourant une voie à une période donnée. Il est composé de véhicules divers par leurs caractéristiques physiques (poids, longueur, puissance…) et autres (vitesse désirée, nombre de passagers…).

Pour mesurer les flots de véhicules, nous s'intéressons à des variables globales dont les définitions sont données ci-après.

Voici la synthèse des définitions présentées ci-dessus. **[2]**

#### *II.2.3.1. Le débit (Q)*

Est le nombre N de véhicules passant pendant une période ΔT en un point x,

Rapporté à la durée de la période :

$$Q_{\Delta t}(x) = Q(x, t \rightarrow t + \Delta t) = \frac{N}{\Delta t}. \quad \textbf{(II.5)}$$

Il est exprimé en nombre de véhicules par unité de temps (véh/h ou véh/s généralement) **[2].**

### *II.2.3.2. La concentration(K)*

Appelée aussi densité, est le nombre M de véhicules situés entre x et x + ΔX à un instant t, rapporté à la longueur de la voie :

$$K_{\Delta x}(t) = K(x \rightarrow x + \Delta x, t) = \frac{M}{\Delta x}. \quad \textbf{(II.6)}$$

La concentration est exprimée en nombre de véhicules par unité de longueur (véh/km ou véh/m).

Il est intéressant de remarquer que si le débit est mesuré en un point pendant une période, la concentration, elle est mesurée à un instant le long d'un tronçon de route.

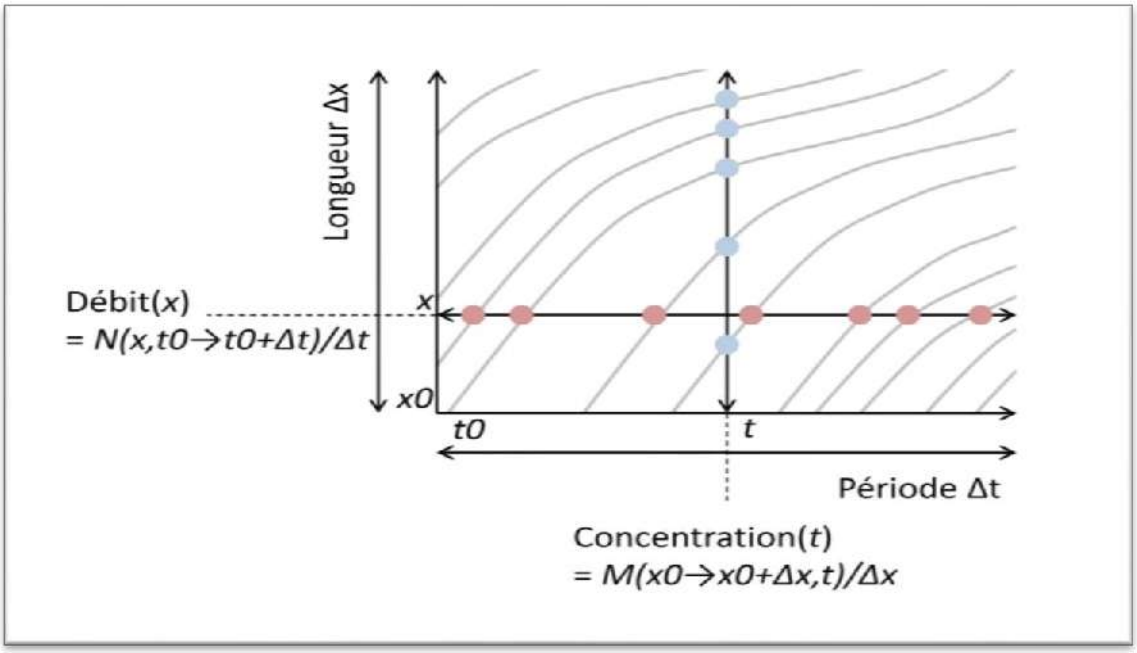



**Figure II.6.** *Représentation dans le plan (x, t) de la mesure du débit en un point x et de la concentration à un instant t.*

Sur cette figure les N véhicules passant en au point X pendant la période Δt sont figurés en rose, alors que les M véhicules présents à un instant t sur une portion de voie de longueur Δx sont figurés en bleu. **[2]**

### *II.2.3.3. Le temps de présence*

Le temps de présence c'est la durée de passage d'un mobile au travers d'un plan fictif orthogonal à sa trajectoire. **[3]**

### *II.2.3.4. Le taux d'occupation*

Noté TO c'est le rapport de la somme des temps de présence à la durée de la séquence exprimé en pourcentage

$$TO(t \rightarrow t + \Delta t) - \frac{100}{\Delta t} \times \sum_{i=1}^{N} \theta_i \quad \textbf{(II.7)}$$

Bien que le taux d'occupation rende compte d'un niveau de saturation de la chaussée (il est généralement admis qu'un taux d'occupation supérieur ou égal à 30 %, pour des séquences de quelques minutes, caractérise un état de saturation), l'utilisation de ce seul paramètre n'est pas suffisante. Il doit être couplé avec le débit ou la vitesse pour pouvoir en déduire une analyse du niveau de service de l'infrastructure. Cette analyse ne peut se faire que grâce à l'application d'un algorithme ou par une représentation sous forme graphique. **[3]**

### *II.2.3.5. Temps inter-véhiculaires (TIV)*

Le temps séparant le débute de la sortie d'un mobile d'un plan fictif orthogonal à sa trajectoire de l'instant d'entrée du mobile suivant dans le même plan.

La mesure du temps inter-véhiculaires est d'un grand intérêt pour les opérations d'exploitation de la route en temps réel à condition toutefois de faire une segmentation pour ne retenir que les T.I.V. courts, par exemple < 1 ou < 4 s. Le T.I.V. est également la mesure de base qui permet d'accéder aux mesures inter-véhiculaires **[3]**.

### *II.2.3.6. Distance inter-véhiculaires (DIV)*

La **DIV** c'est la distance séparant l'avant d'un mobile et l'arrière du président. De même que pour les T.I.V. On ne s'intéresse qu'aux distances inter-véhiculaires courtes dans un but d'analyse de la sécurité, surtout si les conditions météorologiques sont dégradées **[3]**.

### *II.2.3.7. L a vitesse individuelle et la longueur des véhicules*

Lorsque nous disposons non pas d'une mais de deux boucles électromagnétiques placées à une distance faible l'une de l'autre, nous pouvons mesurer la longueur et la vitesse individuelle de chaque véhicule, ainsi que l'illustre la figure ci-dessous.

Si **t** est le temps séparant la détection d'un véhicule par la première boucle de la détection par la seconde et si on connaît **d**, la distance entre les deux boucles, alors la vitesse individuelle se calcule comme :

$$V = d / t. \quad \textbf{(II.8)}$$

Pour l'usager, seule la vitesse moyenne ou le temps de parcours sur un itinéraire présente un intérêt. Cette notion de vitesse moyenne est un bon indicateur pour l'exploitation de la route, que ce soit pour un diagnostic, des études préalables ou pour en mesurer l'efficacité ultérieure **[3]**.

### *II.2.4. Relation entre la vitesse du flot, la concentration et le débit*

La mécanique des fluides nous enseigne que le débit est égal au produit de la concentration et de la vitesse du flot **Q = K * U**. **(II.9)**

La vitesse du flot **U** c'est vitesse moyenne des véhicules présents à un instant sur une longueur de route donnée, et donnée par l'équation suivant : **[2]**

$$U = Q / K. \quad \textbf{(II.10)}$$

## II.3. Analyse du diagramme fondamental

Nous avons vu plus haut les définitions d'un certain nombre de grandeurs relatives au trafic :

- le débit **Q**
- la concentration **K**

Comme nous l'avons vu plus haut, nous pouvons relier la concentration au taux d'occupation TO par la relation :

$$TO(t \rightarrow t + \Delta t) = 100 \times (\lambda + L) \times K \quad \textbf{(II.11)}$$

Rappelons que cette formule n'est rigoureusement vraie que si les longueurs des véhicules sont identiques entre elles et égales à $L$ et que la boucle mesure $\lambda$ mètres.

- la vitesse du flot **U** (vitesse moyenne des véhicules présents à un instant sur une longueur de route donnée).

Nous avons également vu que ces trois variables sont reliées par la relation **[2]**

$$Q = K \times U$$

### *II.3.1.Les deux zones du diagramme fondamental*

Si nous cherchons à lier le débit à la concentration, nous constatons qu'il existe deux régimes différents :

- lorsque la concentration est faible, nous pouvons supposer que le débit qui passe en un point va croître de manière presque linéaire. Si les véhicules ne sont pas contraints, alors plus ils sont nombreux dans une zone de longueur constante située en amont d'un point donné (concentration), plus ils seront nombreux à passer dans les minutes suivantes en ce point (débit). Ceci est vrai jusqu'à ce que le débit atteigne la capacité de la voie. À ce moment-là, en effet, il y a une contrainte qui s'oppose à l'écoulement libre des véhicules ;
- au-delà d'un certain point (que l'on nous appelons le **point critique**) la congestion apparaît ; les contraintes subies par le trafic et qui se reflètent par une limitation du débit (parce qu'il y a une limitation de la capacité de la voie en aval, par exemple) induisent une augmentation de la concentration. Donc, au-delà du point critique, plus le débit passant en un point diminue, plus la concentration augmente.

Ces deux régimes se traduisent par les deux zones de la figure suivante. La zone de gauche est la zone de trafic fluide, la zone de droite, la zone de congestion.

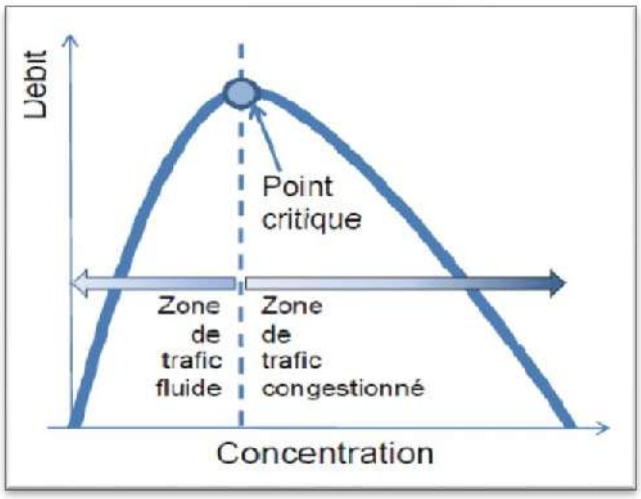



**Figure II.7.** *Les deux zones de comportement du trafic routier.*

Il est à noter que la forme générale de la courbe d'évolution du débit en fonction de la concentration n'est qu'une forme parmi d'autres possibles. **[2]**

### *II.3.2. Les trois représentations du diagramme fondamental*

Nous avons rappelé que le débit et la concentration sont reliés, en chaque point du réseau et en chaque instant, par la vitesse du flot. Nous pouvons donc représenter la relation fondamentale de la figure précédente de trois manières différentes :

- La concentration en fonction de débite : Q=F1 (k).
- La vitesse en fonction de débite : V=F2 (Q).
- La vitesse en fonction de concentration V=F3 (K). **[2]**

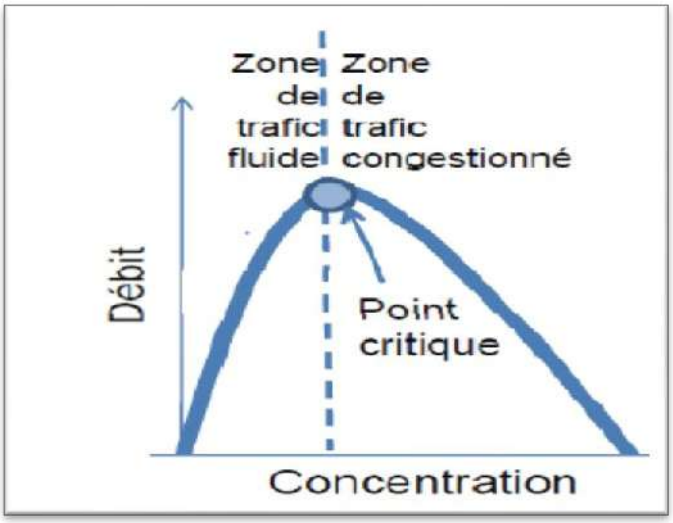



**Figure II.8.** *Diagramme du débit (véh/h) en fonction de la concentration (véh/km)*

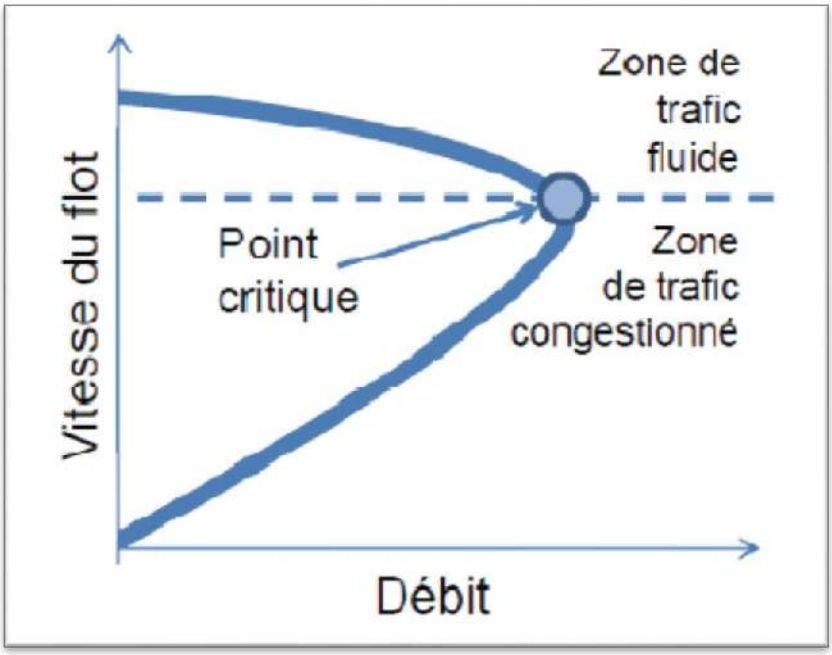



**Figure II.9**. *Diagramme de la vitesse (km/h) en fonction du débit*

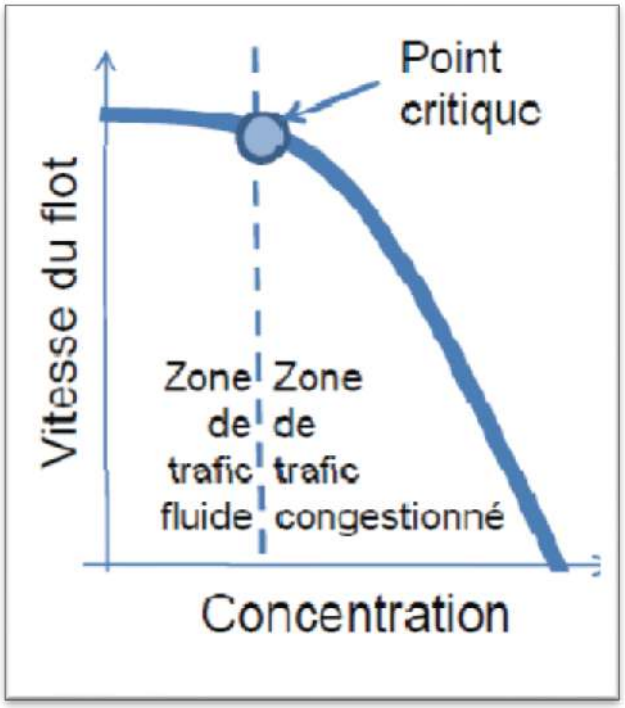



**Figure II.10.** *Diagramme de la vitesse en fonction de la concentration***.**

.

### *II.3.3. Passage de taux d'occupation à concentration*

Nous avons rappelé ci-dessus l'équation qui permet de passer du taux d'occupation à la concentration. Nous avons insisté sur le fait que cette équation n'est valable que si les longueurs de véhicules sont uniformes et constantes. Ceci n'est quasiment jamais le cas (les flots sont composés pour partie de véhicules légers et de véhicules lourds et la proportion varie au cours du temps).

La figure suivante illustre l'influence de la longueur des véhicules sur le calcul de la concentration, simplement en associant le rapport du débit et de la vitesse du flot au **TO** mesuré.

Cette figure est obtenue avec des données de trois voies différentes d'une autoroute, où un trafic de poids lourds important est constaté, occupant principalement la voie de droite. La période d'agrégation est d'une minute.

Nous constatons que le fonctionnement de la voie de droite est très différent de ce que l'nous observons pour les deux autres voies.

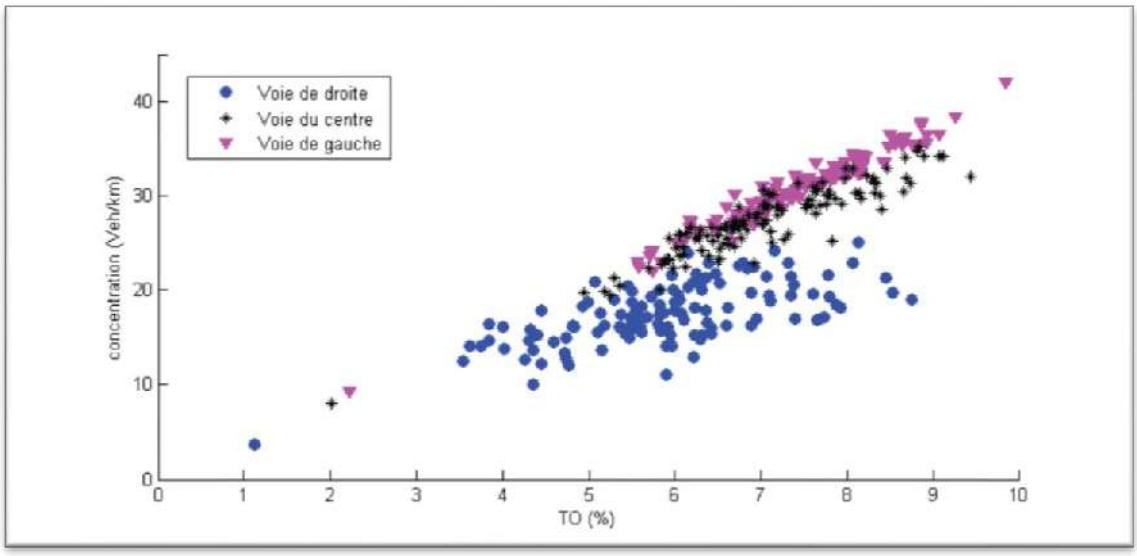



**Figure II.11.** *Relation entre le taux d'occupation et la concentration (estimée par le rapport entre débit et vitesse de flot).*

Nous constatons que le coefficient de proportionnalité est très dépendant de la voie. Nous constatons pour la voie de droite en particulier, où les longueurs varient beaucoup, qu'il n'existe aucune relation linéaire. Une formule plus exacte que la précédente (dans laquelle l'hypothèse de longueurs homogènes et constantes n'est plus nécessaire) peut être trouvée. Cette formule fait appel à la covariance de la longueur et est assez difficile à utiliser en pratique.

En conclusion sur cette partie, nous insisterons sur le fait que le calcul de la concentration doit être fait, autant que possible par le rapport entre le débit et la vitesse du flot et non à partir du taux d'occupation. Il est donc crucial que la vitesse soit mesurée correctement, c'est-à-dire, si nous utilisons des boucles, comme la moyenne harmonique des véhicules passant en un point pendant une période. **[2]**

## II.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, les variables du trafic : individuelles et collectives. Ensuite, nous avons décri un certain nombre d'outils simples issus de la théorie du trafic qui permettent d'évaluer le trafic routier et de comprendre les principaux mécanismes à la base de l'apparition de la congestion.

# CHAPITRE3:
# Réalisarion du système de mesure du trafic routier

CHAPITRE 3

## III.1. Introduction

Dans ce chapitre nous décrivons la conception qui traduit les différents besoins à notre application. Ensuite l'implémentation de notre système d'évaluation du trafic routier urbain. Pour ce faire, nous présentons tous les outils qui ont été utilisés et nous terminons par des tests pratiques.

## 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.

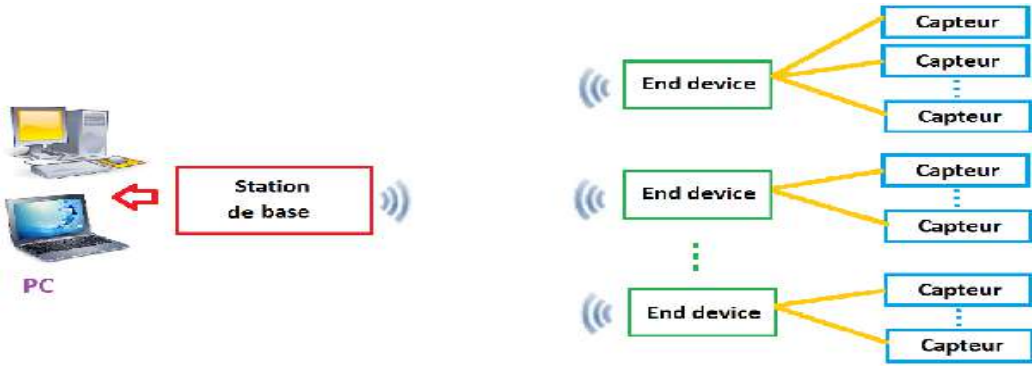



**Figure III.1.** *Schéma de principe du système réalisé.*

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 sont envoyées vers une station de base qui est reliée à un PC 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.

## III.3.Module capteur utilisé

Le capteur HC-SR04 utilise les ultrasons pour déterminer la distance d'un objet. Il offre une excellente plage de détection sans contact, avec des mesures de haute précision et stables. Son fonctionnement n'est pas influencé par la lumière du soleil ou des matériaux sombres, bien que des matériaux comme les vêtements puissent être difficiles à détecter.**[6]**

### *III.3.1.Caractéristiques*

- **Dimensions :** 45 mm x 20 mm x 15 mm
- **Plage de mesure :** 2 cm à 400 cm
- **Résolution de la mesure :** 0.3 cm
- **Angle de mesure efficace :** 15 °
- **Largeur d'impulsion sur l'entrée de déclenchement :** 10 µs (Trigger Input Pulse width).**[6]**

### *III.3.2.Broches de connections*

- **Vcc** = Alimentation +5 V DC
- **Trig** = Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input)
- **Echo** = Sortie de mesure donnée en écho (Echo output)
- **GND** = Masse de l'alimentation **[6]**

### *III.3.3.Spécifications et limites*

**Table III.1.** *Spécifications et limites du capteur HC-SR04*

| **Paramètre** | **Min** | **Type** | **Max** | **Unité** |
|---|---|---|---|---|
| Tension d'alimentation | 4.5 | 5.0 | 5.5 | V |
| Courant de repos | 1.5 | 2.0 | 2.5 | mA |
| Courant de fonctionnement | 10 | 15 | 20 | mA |
| Fréquence des ultrasons | - | 40 | - | KHz |

### *III.3.4.Fonctionnement*

Pour déclencher une mesure, il faut présenter une impulsion "high" (5 V) d'au moins 10 µs sur l'entrée "Trig". Le capteur émet alors une série de 8 impulsions ultrasoniques à 40 kHz, puis il attend le signal réfléchi. Lorsque celui-ci est détecté, il envoie un signal "high" sur la sortie "Echo", dont la durée est proportionnelle à la distance mesurée.**[6]**

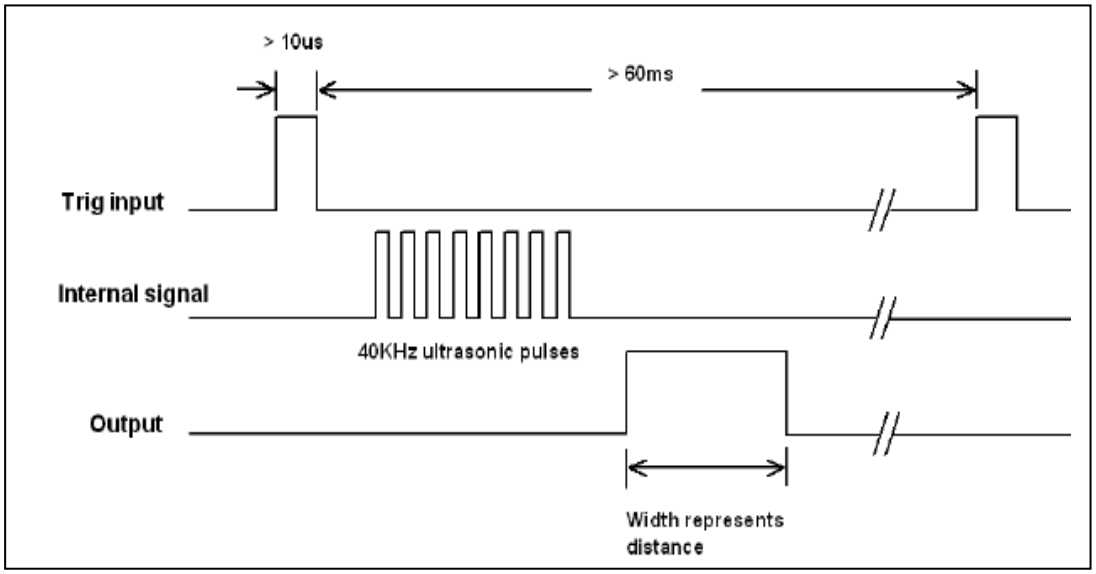



**Figure III.2.** *Fonctionnement de capture HC-SR0.*

### *III.3.5.Distance de l'objet*

La distance parcourue par un son se calcule en multipliant la vitesse du son, environ 340 m/s par le temps de propagation, soit :

**d = v * t**

Le HC-SR04 donne une durée d'impulsion en dizaines de µs. On sait que le son fait un aller-retour. La distance vaut donc la moitié.

d = (34000 cm/1000000 µs) / 2 * durée d'écho (en µs)

Et en simplifiant : d =170000 /1000000 cm * durée d'écho

Finalement, **d(cm) = 0,017 * durée d'écho (µs)**

## III.4. Implémentation

Dans cette partie, on va présenter les outils hardware et software qu'on a utilisés dans la réalisation du système d'évaluation de la surveillance du trafic routier urbain.

### *III.4.1. Présentation du kit eZ430 RF2500*

#### *III.4.1.1. Définition*

Le kit **eZ430-RF2500** est un outil de développement complet pour les microcontrôleurs **MSP430** de Texas Instrument. Avec une interface USB permettant de programmer le microcontrôleur ainsi que l'émetteur-récepteur sans fil **CC2500** 2.4-GHz.

#### *III.4.1.2. CaractéristiqueseZ430 - RF2500*

- 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

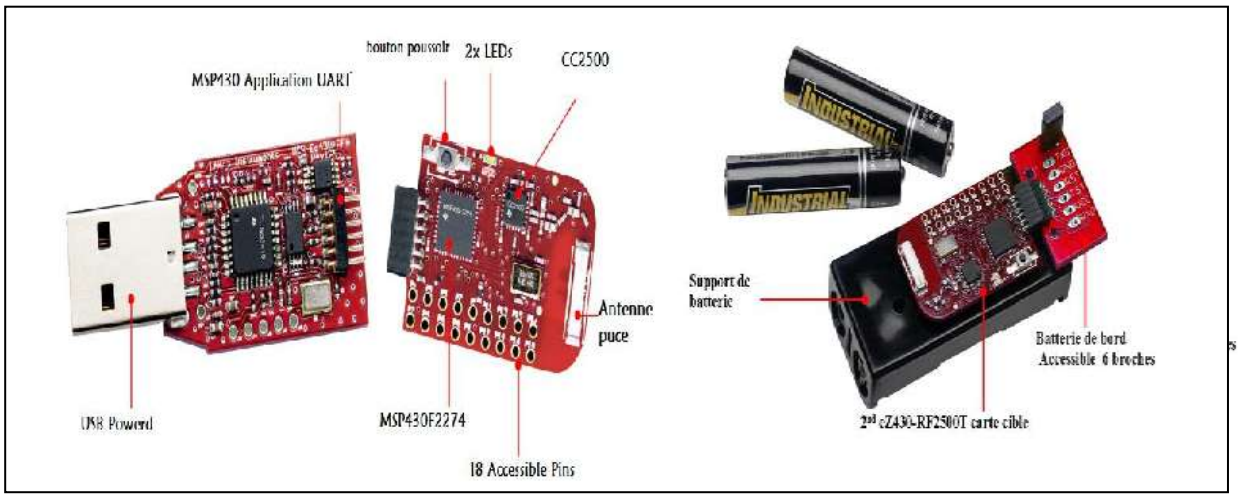



**Figure III.3**. *Kit du développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments avec un module d'alimentation***.**

#### *III.4.1.3. 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.4** et décrites dans les Tableaux **III.2** et **III.3**[7]**.**

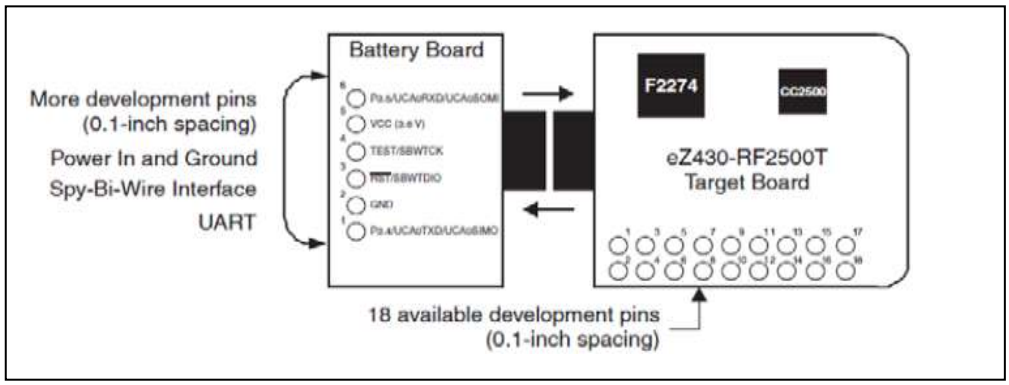



**Figure III.4**. *Entrées/sorties du support batterie et du nœud eZ430-RF2500.*

LeTableau III.2 regroupe la désignation des entrées/sortie du support batterie

**Tableau III.2.** *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.3.***Entrées/ Sorties du connecteur d'un nœud eZ430-RF2500.*

| PIN | Fonction | Description |
|---|---|---|
| **01** | GND | Ground référence |
| **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 / | General-purpose digital I/O pin / Time_A, capture: CC\|1B |

| | | |
|---|---|---|
| | VREF- / VeREF- / OA1\|1 / OA1O | 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 référence |
| ***13*** | P2.6 / XIN (GDO0) | General-purpose digital I/O pin / Input terminal of crystal oscillator |
| ***14*** | P2.7 / XOUT (GDO2) | General-purpose digital I/O pin / Output terminal of crystal oscillator |
| ***15*** | P3.2 / UCB0SOMI / UCB0SCL | General-purpose digital I/O pin<br>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<br>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<br>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 10bits de type SARavec fréquence max de 200 kms/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 DCO, l'horloge auxiliaire (**ACLK**) et l'horloge sous maître (**SMCLK**) qui est utilisée par certains périphériques.

### *III.4.3. Protocole SimpliciTI [7]*

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.

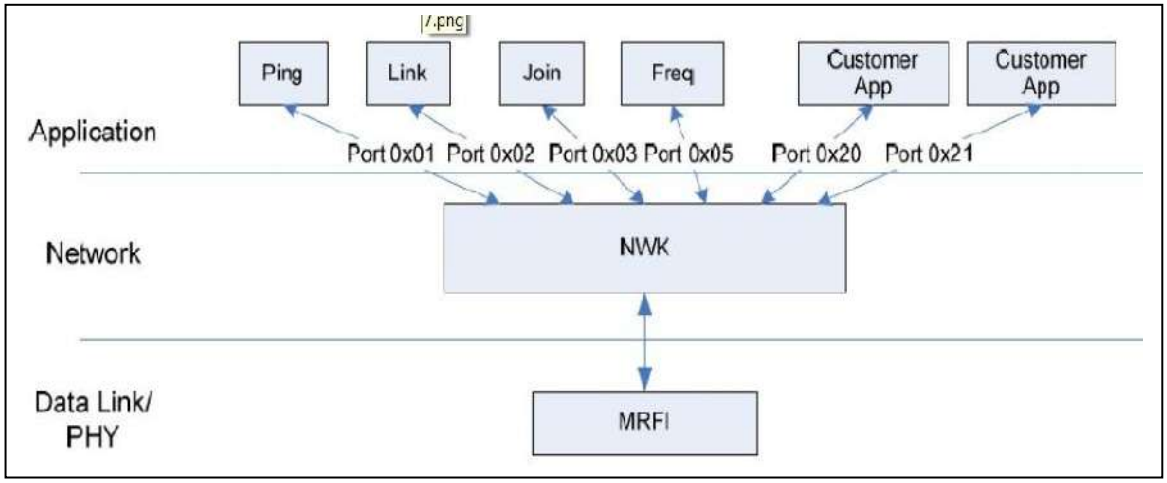



**Figure III.5.***Couches logiques du protocole SimpliciTI.*

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 devise » 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 sont 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 Workbenchpour le MSP430

L'outil « **IAR** Embedded Workbench™ » est un environnement de développement intégré, permettant de développer et gérer les applications embarquées sous forme de projets.

Tous les outils nécessaires aux développements ont été intégrés dans l'environnement de travail, soit:

- un compilateur **C/C++** optimisé pour les applications utilisant un **MSP430**,
- un assembleur pour le **MSP430**,
- un éditeur convivial,
- un système de management de projet,
- un programme de mise au point (debugger).

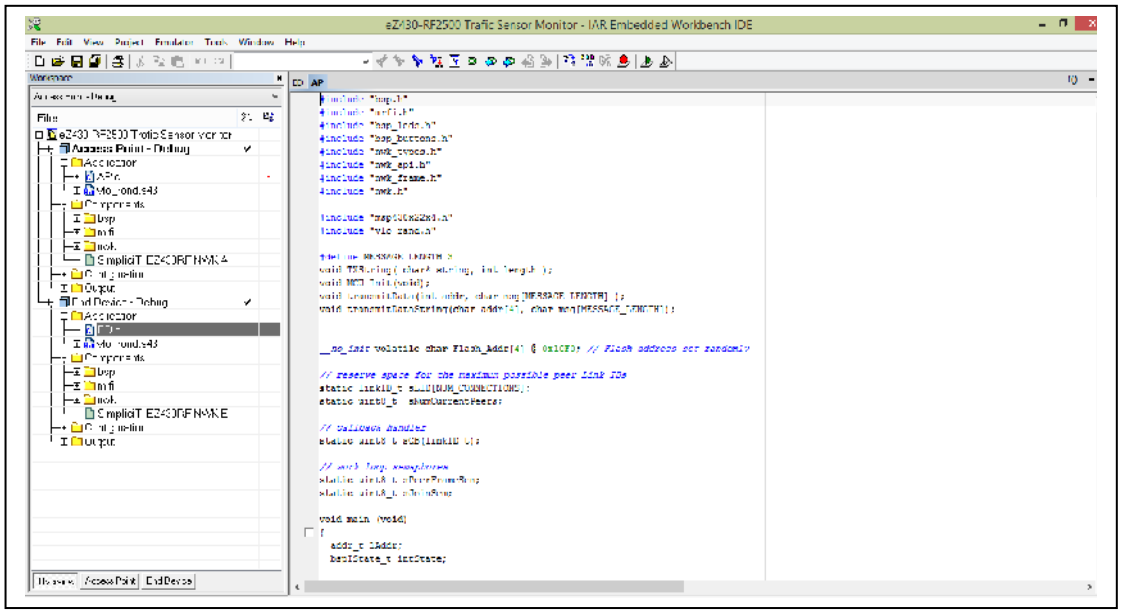



**Figure III.6**. *Capture d'écran d'IAR*

### *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 sensor 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.
- **Nwk :** (Network) gère les files d'attente Rx et Tx et distribue les trames à leurs destination

### *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 **[7].**

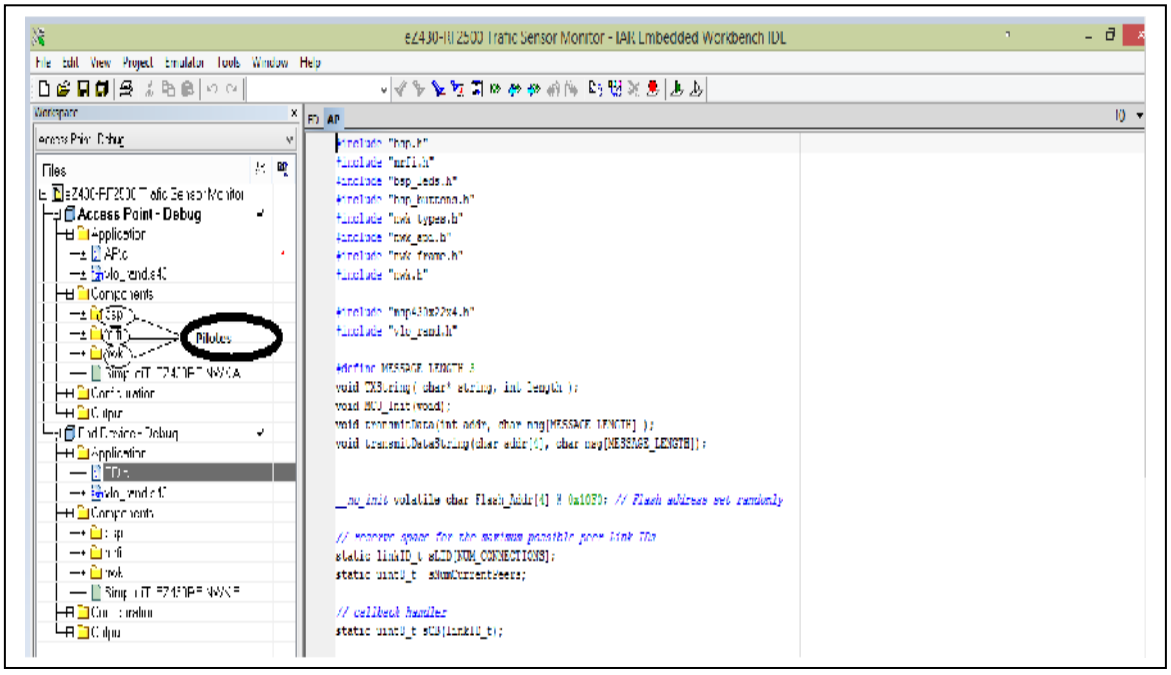



**Figure III.7.***Capture d'écran du projet réalisé sous l'environnement IAR.*

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

Le projet réalisé nommé **eZ430-RF2500-trafic sensor Monitor** assure la communication entre les différents nœuds capteurs du réseau (End devise : **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 la carte (tels que les LEDs) qui sont utilisés dans l'application.

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

- Le **MCLK**réglé pour fonctionner à 8 MHz.
- Le **Timer_A** est initialisé pour déclencher une interruption à des intervalles de 30 secondes.
- L'interface de communication série universel (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 nouvel **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 lesPeerFrameSem 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 de 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 des autres paquets.

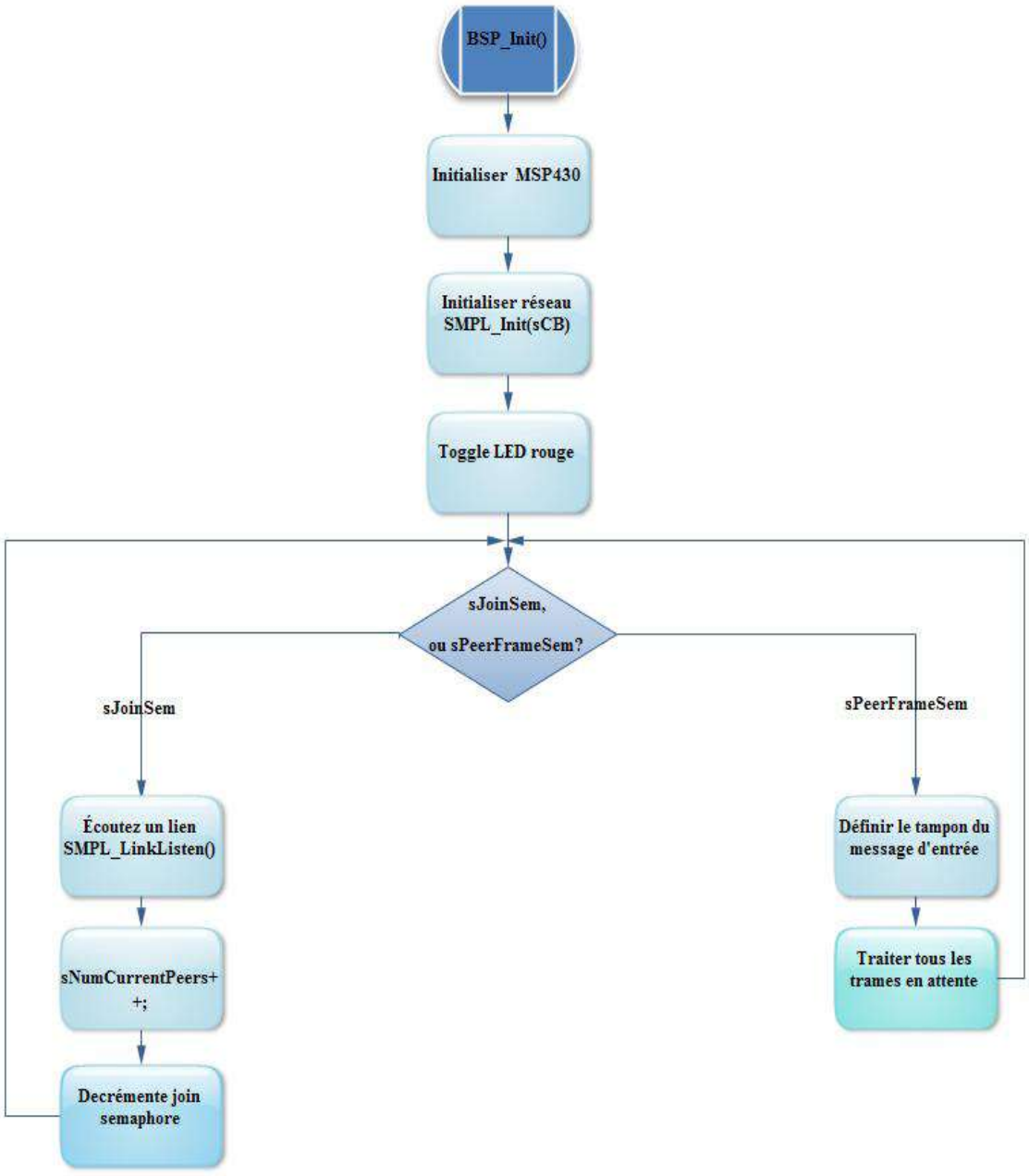



**Figure III.8.***Organigramme principal du programme de l'AP***.**

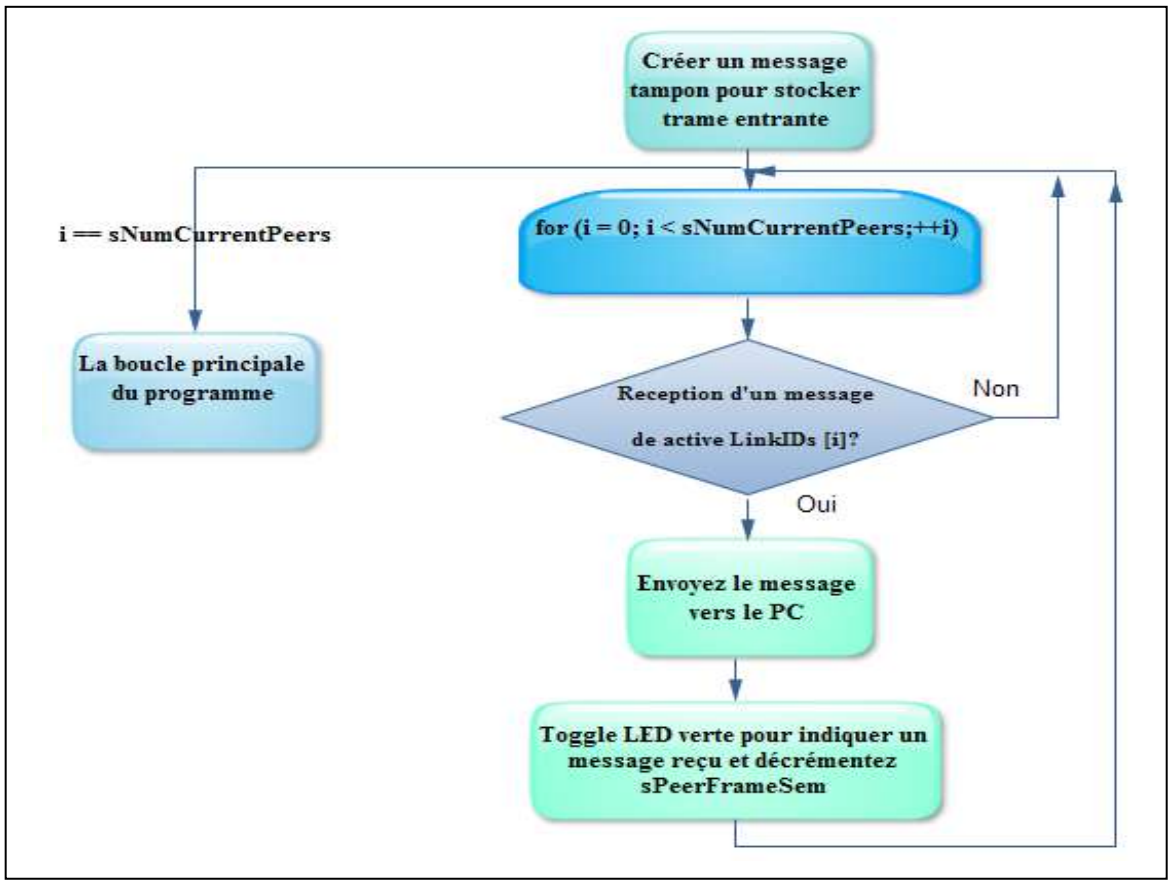



**Figure III.9.***Organigramme du traitement des trames en attente au niveau de l'AP.*

### *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 du capteur ultrason. Ce dernier est implémenté par une fonction qui envoie une impulsion de déclenchement (trigger) à travers le port **P2.0** du MSP430, et mesure la durée de l'impulsion d'Echo sur le port **P4.4**. Un deuxième sous-programme d'interruption déclenché par le timer qui compte le délai choisi (**30** secondes) pour communiquer la valeur comptée des véhicules détectés à la station de base.

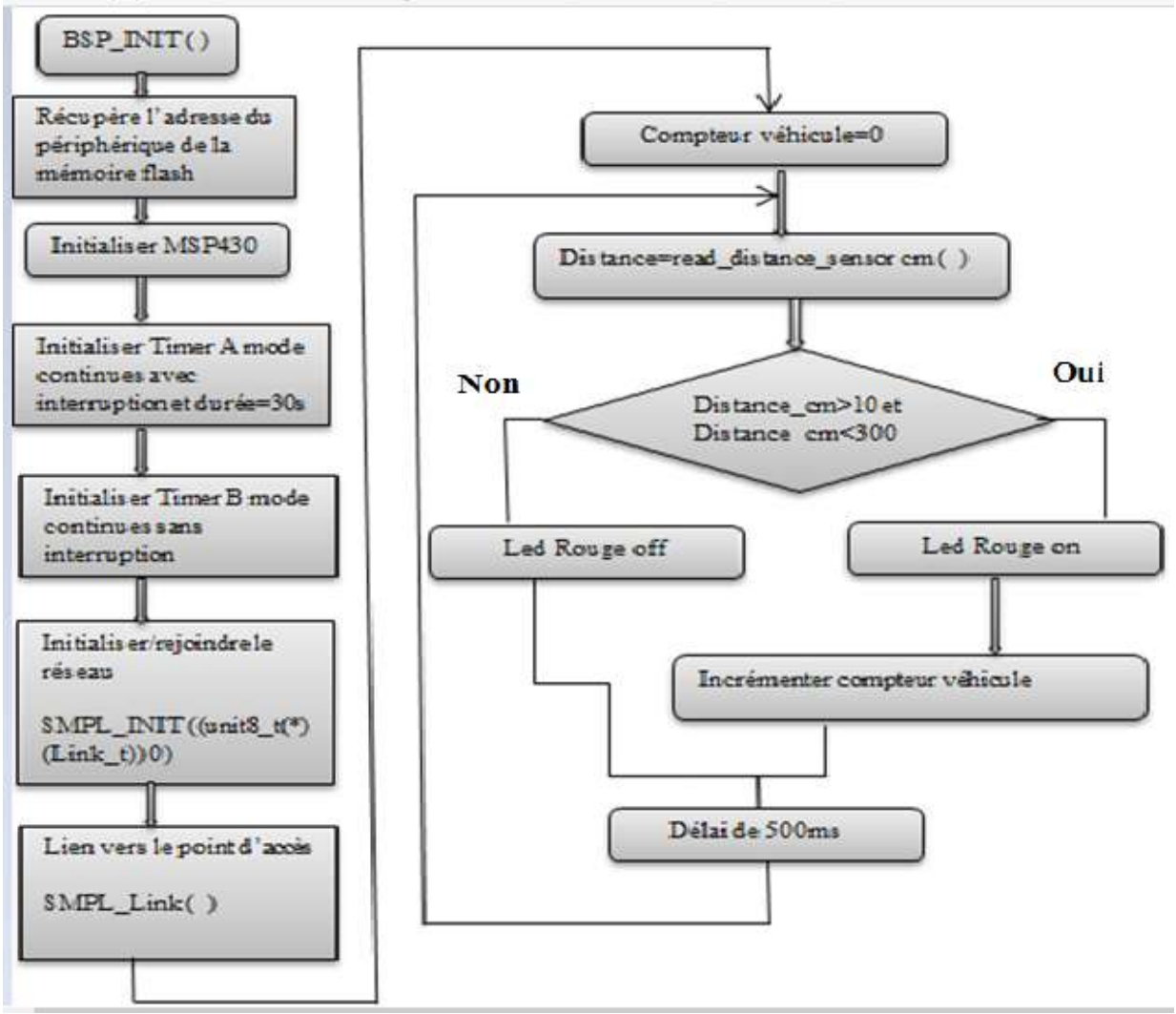



**Figure III.10.** *Organigramme du programme du nœud capteur (ED).*

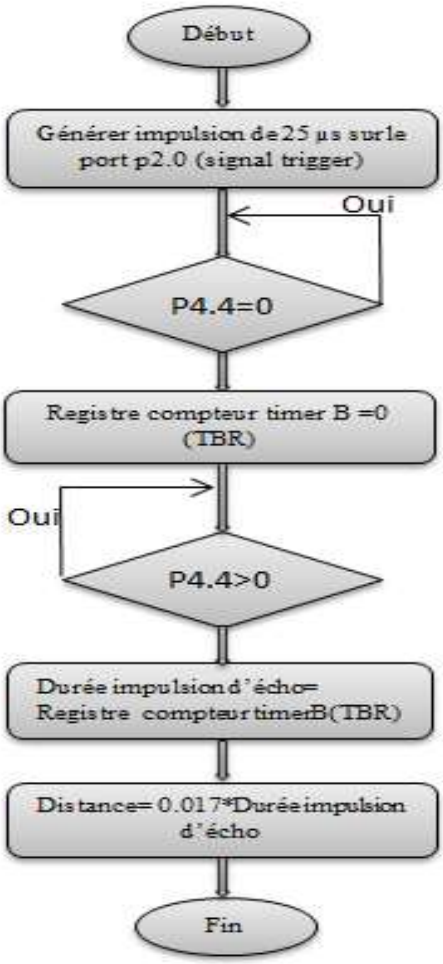



**Figure III.11 :** *Organigramme de la fonction de calcul de la distance.*

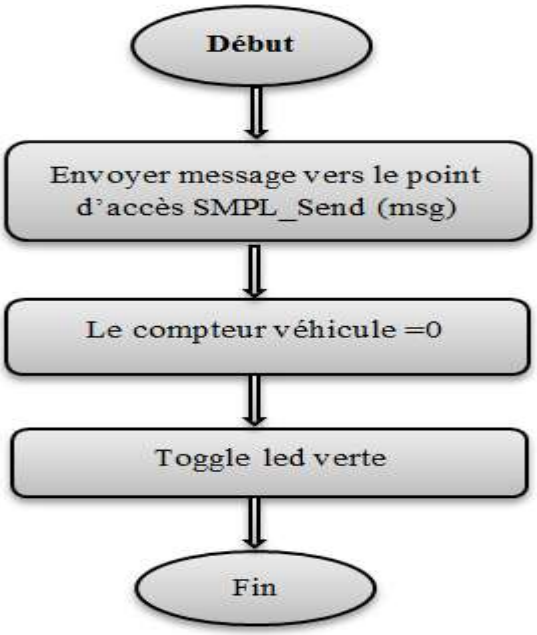



**Figure III.12.** *Organigramme du sous-programme d'interruption Timer A pour l'émission des nombres de véhicules vers l'AP.*

### *III.6.3.* Branchement du capteur avec le nœud

Le branchement du capteur HC-SR04 sur le microcontrôleur MSP430 est représenté sur la figure III.13. L'entrée "Trig" du capteur est reliée à P2.0. Quant à la sortie "Echo" du capteur à P4.4.En plus, Le module est alimenté en 5 V.

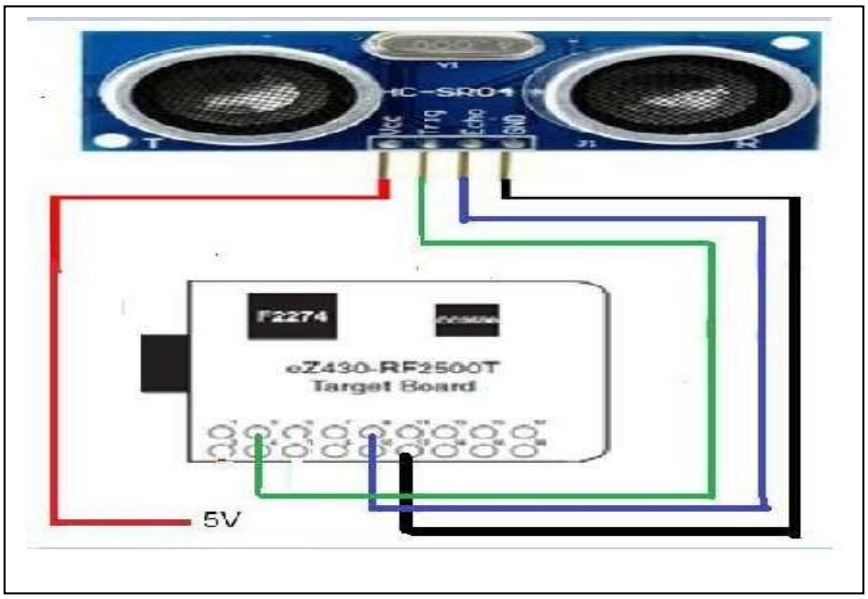



**Figure III.13.** *Schéma de branchement du capteur HC-SR04.*

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

Nous avons mis à côté de deux voies A et B deux nœuds capteurs équipés des capteurs HC-SR04. 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.

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 de chaque nœud appartenant au réseau de surveillance.




**Figure III.14.** *Emplacement des modules capteurs HC-SR04.*

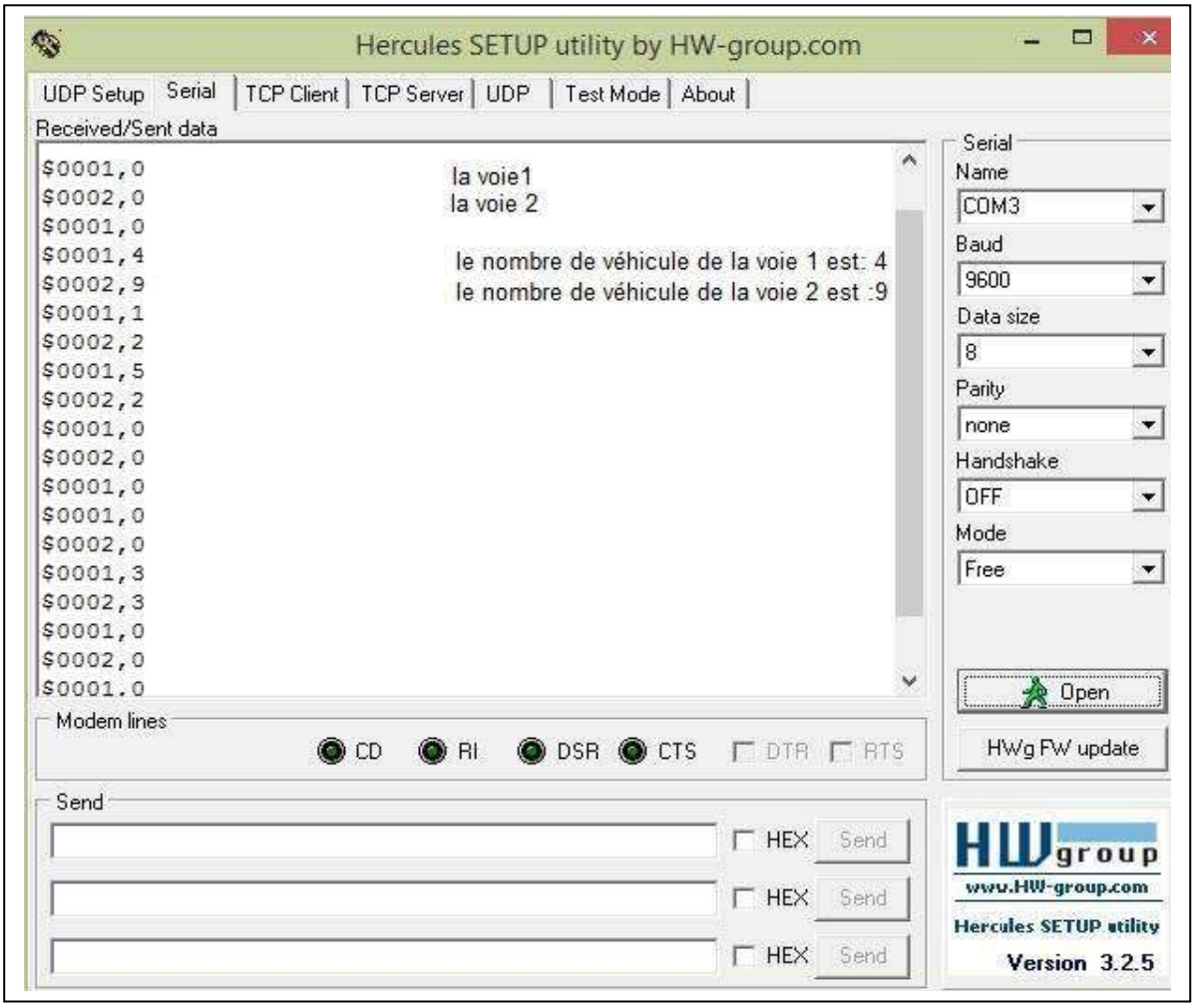



**Figure III.15.** *Résultat de test.*

## III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avonsprésenté la conception et l'implémentation d'un système d'évaluation du trafic routier urbain. Le système conçu utilise des mesures provenant des modules capteurs à ultrason connectés aux nœuds capteurs du kit de développement ez430-2500. Plusieurs tests pratiques ont montrés l'efficacité du système développé.

# *Conclusion Générale*

Au cours de ce mémoire nous avons présenté premièrement les méthodes de mesure des variables de trafic routier.En deuxième partie, nous avons montré les méthodes d'évaluation de trafic routier.

Finalement nous avons traité toutes les phases nécessaires à la réalisation du système de cette application dans laquelle nous avons appris à mieux manipuler le langageIAR.

En outre, les avantages de notre application sont les suivants :

- d'avoir un système qui donne de bons résultats avec un minimum de cout.et qui demande un minimum d'entretien
- type de capteurs à faible consommation énergétique.
- Système autonome.

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

# *Références bibliographiques*

**[1] :** Itra1_Poly_chap3 Méthodes De Mesure Des Variables De Trafic

**[2] :** Christine Buisson, Jean Baptiste Lesort**,** comprendre le trafic Méthodes et calculs, Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer, Editions certu

**[3] :** Karmet Said Amine, Evaluation de la congestion d'un réseau routier urbain Mémoire de Master en Informatique Université de Médéa Juin2014/2015.

**[4] :** Marie Christine Esposito (Chef de Projet), Rapports d'études panorama des systèmes de recueil de données de trafic routier Edition Sétra, Novembre 2012.

**[5] :** Oussama Benzaid, Ishak Bouyahia, surveillance de trafic routier urbain par un réseau de capteur sans fil, Mémoire de Master en Génie électrique, Option Système Intelligents et Communicants, Université de Médéa, Juin 2015

**[6] :** HC-SR04 - Module de détection aux ultrasons - Utilisation avec Picaxe Document PDF, Consulté le 11/06/2016.

**[7] :** Hamza AYZI, Ismaïl ELHASNAOUI Implantation de capteurs communicants enfouis dans le béton à l'aide de l'outil de développement eZ430-RF2500 de Texas Instruments».

**[8] :** Sébastien Faye, Claude Chaudet, Isabelle Demeure, Contrôle du trafic routier urbain par un réseau fixe de capteurs sans fil, Edition Hal archives-ouvertes, 25 Juin 2013

Hindawi Publishing Corporation International Journal of Distributed Sensor Networks Volume 2014, Article ID 961073, Traffic Information Acquisition System with Ultrasonic Sensors in Wireless Sensor Networks