

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie électrique et informatique

Utilisation de l'échantillonnage compressif pour la détection des véhicules par un réseau de capteurs sans fil

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie électrique

Maurice SIPOUO NGANDJON

Jury : Pr. Soumaya CHERKAOUI (Directrice)
Pr. Frédéric MAILHOT (Évaluateur)
Pr. Daniel DALLE (Rapporteur)

Sherbrooke (Québec) Canada

2012

IV-2231



Library and Archives
Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-90957-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-90957-7

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

“Qui n’a pas connu la pénombre des vallées ne connaîtra jamais l’extraordinaire joie des sommets.”

Richard NIXON, 37^ePrésident des États – Unis d’Amérique.

À ma mère, Madame NGANDJON née TCHIENOU Geornique pour toutes ses peines pour me voir devenir un homme, pour tous ses vœux d’être heureux en me voyant heureux. Je te dédie chère maman, ce mémoire.

RÉSUMÉ

Une nouvelle technique pour étudier le trafic routier, est la détection des véhicules par un réseau de capteurs sans fil installés dans la chaussée. Cette technologie se distingue de la plupart des systèmes classiques de détection de véhicules par son faible coût, son niveau élevé de flexibilité dans la configuration, sa multifonctionnalité par l'ajout d'autres modalités de détection et sa capacité à transmettre les informations via un réseau sans fil. Cependant, quand un capteur sans fil effectue l'acquisition du signal de champ magnétique terrestre dans l'optique de détecter le passage des véhicules, il l'échantillonne à une certaine fréquence, afin de ne pas rater le passage d'un véhicule. Lorsque la séquence de mesure dure plusieurs heures et qu'on a des dizaines ou des centaines de capteurs sans fil installés dans la chaussée, on se retrouve rapidement avec des données à stocker et à traiter qui peuvent être de taille importante. En outre, les communications sans fil de ces données sont très coûteuses en énergie et réduisent ainsi la durée de vie du capteur sans fil qui dispose des ressources limitées en énergie. Le *compressive sensing* (échantillonnage compressif), nouvelle méthode d'échantillonnage des signaux, tente justement de donner des solutions à ces problèmes, en réduisant significativement le nombre de mesures nécessaires et en utilisant par la suite des algorithmes d'optimisation convexe pour reconstruire tout le signal sans trop de perte perceptuel. À travers des simulations effectuées sur des signaux enregistrés par les capteurs sans fil de la compagnie allemande *Coalesenses*, nous montrons dans ce projet de recherche que l'échantillonnage compressif peut contribuer à maximiser considérablement la durée de vie d'un réseau de capteurs sans fil.

Mots-clés : l'échantillonnage compressif, les réseaux de capteurs sans fil, le trafic routier.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche n'aurait pu aboutir sans une réelle collaboration et un échange d'idées entre toutes celles et ceux qui y ont participé; je tiens ici à les remercier.

En premier lieu, ma reconnaissance s'adresse à Madame Cherkaoui Soumaya, professeure au département de génie électrique et génie informatique de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke et responsable du laboratoire Interlab, qui a encadré ce travail de recherche. Sa confiance ne m'a jamais fait défaut, et elle a constamment porté un regard critique, ouvert et constructif sur mes travaux. En dépit d'un emploi du temps fort chargé, j'ai conscience des efforts qu'elle a dû fournir pour se rendre disponible, particulièrement durant la phase de rédaction de ce mémoire.

Je remercie les techniciens en électronique et en informatique de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke et plus particulièrement Messieurs Sylvain Pépin et Serge Caron. Leurs dévouements et leurs rapidités de réaction ont contribué de manière remarquable à la mise en place d'expériences performantes.

Merci à Messieurs Frédéric Mailhot et Daniel Dalle, professeurs au département de génie électrique et génie informatique de la Faculté de génie de l'Université de Sherbrooke, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de mémoire ainsi que pour leurs observations constructives pour finaliser ce travail.

La recherche est avant tout une aventure humaine faite de rencontres et souvent d'amitiés. J'ai eu un réel plaisir de la partager avec de nombreux étudiants chercheurs : Bruno Gagnon, Serge Kodjo, Thomas Camrier, Jeoffroy Bodi et Dany Merhej. Que toutes ces personnes reçoivent ici l'expression de ma profonde gratitude et ma haute considération.

Finalement, je voudrais remercier ma famille pour la confiance qu'elle m'a toujours accordée, leur patience et leur soutien indéfectible. Qu'ils voient en ces quelques lignes l'expression de ma profonde affection et ma reconnaissance.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES ACRONYMES	ix
CHAPITRE 1 Introduction	1
CHAPITRE 2 L'échantillonnage compressif.....	3
2.1 Généralités.....	3
2.2 Paradigme d'acquisition de données.....	4
2.3 La parcimonie.....	6
2.4 L'échantillonnage incohérent.....	8
2.5 La reconstruction des signaux parcimonieux.....	8
2.6 Le théorème fondamental de l'échantillonnage compressif.....	11
2.7 Intérêt de l'ÉC pour la détection de véhicules par les RCSF.....	13
CHAPITRE 3 Les réseaux de capteurs sans fil.....	14
3.1 Définition	14
3.2 Anatomie d'un nœud capteur.....	14
3.2.1 Le module d'acquisition	15
3.2.2 Le module de traitement	15
3.2.3 Le module de communication.....	16
3.2.4 Le module d'alimentation énergétique	16
3.2.5 Composants additionnels	17
3.3 Architecture de communication d'un RCSF.....	18
3.4 Architecture protocolaire d'un RCSF	19
3.5 Application des réseaux de capteurs sans fil.....	21
3.5.1 Application orientée requête	21
3.5.2 Application orienté évènement	22
3.5.3 Application temporelle	23
3.5.4 Application hybride	23
3.6 Les RCSF utilisés pour la gestion du trafic routier.....	24
3.7 Justifications de l'utilisation des RCSF pour le trafic routier.....	25
3.7.1 La flexibilité.....	26

3.7.2	La multifonctionnalité.....	26
3.7.3	La capacité de communication sans fil.....	27
3.7.4	Comparaison des RCSF aux autres technologies de détection de véhicules.....	27
3.8	Contraintes matérielles d'un nœud capteur.....	31
3.9	Problèmes de consommation d'énergie d'un nœud capteur.....	33
3.9.1	L'énergie de capture.....	34
3.9.2	L'énergie de traitement.....	34
3.9.3	L'énergie de communication.....	35
3.9.4	Les sources de surconsommation d'énergie.....	35
3.9.5	Énergie consommée par un nœud capteur.....	37
3.10	Apport de minimisation de consommation d'énergie par le CS.....	38
CHAPITRE 4	Détection de véhicules par un RCSF.....	41
4.1	Objectif.....	41
4.2	Les composants matériels.....	42
4.2.1	Le nœud capteur.....	44
4.2.2	La station de base.....	49
4.3	La plateforme logicielle.....	50
4.4	Adaptation de l'application des nœuds capteurs.....	51
4.5	Mise en œuvre expérimentale.....	53
4.6	Calcul des paramètres du trafic.....	55
CHAPITRE 5	Simulations de l'échantillonnage compressif.....	61
5.1	Principe.....	61
5.2	Bases d'acquisition et de représentation des signaux.....	63
5.3	Matrice modélisant l'acquisition et la projection des signaux.....	68
5.4	Implémentation.....	69
5.5	Résultats.....	70
CHAPITRE 6	Conclusion.....	80
LISTE DES RÉFÉRENCES	82

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 – Un signal temporel parcimonieux dans la base de Fourier	6
Figure 2.2 – Exemple de la minimisation dans R^2 par les normes l_1 et l_2	10
Figure 2.3 - Diverses représentations d'un signal.....	12
Figure 3.1 - Composants d'un nœud capteur adapté de [1]	17
Figure 3.2 - Architecture de communication d'un RCSF [1]	18
Figure 3.3 - Architecture protocolaire des réseaux de capteurs sans fil adapté de [1]	19
Figure 3.4 - Application d'un RCSF pour la gestion du trafic routier [43]	24
Figure 3.5 - Modèle radio de consommation d'énergie [23]	39
Figure 4.1 : Les étapes de la réalisation du projet.....	41
Figure 4.2 - Plateforme matérielle d'un RCSF de la compagnie <i>Coalesenses</i> [11]	43
Figure 4.3 - Nœud capteur assemblé pour la réalisation de l'expérimentation	44
Figure 4.4 - Perturbation du champ magnétique terrestre par un véhicule [9]	45
Figure 4.5 - Schéma de principe de fonctionnement d'un capteur <i>AMR</i> [34]	46
Figure 4.6 - Représentation d'un pont de Wheatstone du capteur <i>Phillips KMZ52</i> [35]	46
Figure 4.7 - Schéma fonctionnel d'un module <i>Jennic JN5148</i> [32].....	48
Figure 4.8 - La station de base assemblée pour la réalisation de l'expérimentation	49
Figure 4.9 - Architecture du système d'exploitation de <i>isense software</i> [12]	50
Figure 4.10 - Deux façons de placer les nœuds capteurs.....	53
Figure 4.11 - Schéma expérimental de détection de véhicules sur la chaussée.....	54
Figure 4.12- Schéma expérimental pour estimer la vitesse d'un véhicule	55
Figure 4.13 - Extrait des signaux enregistrés par les nœuds capteurs au bout de 30 secondes	58
Figure 5.1 – Synoptique de l'échantillonnage compressif.....	62
Figure 5.2 - Trois extraits du signal d'un nœud capteur enregistrés au bout de 30 secondes...	66
Figure 5.3 - Représentation spectrale des signaux.....	68
Figure 5.4 - Échantillons des signaux pris aléatoirement dans la base de Fourier	72
Figure 5.5 - Reconstruction des signaux par minimisation de la norme l_1	74
Figure 5.6 – Taux d'erreur de reconstruction des signaux.....	75
Figure 5.7 - Reconstruction des signaux par minimisation de la norme l_2	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Évaluation énergétique de quelques sources d'énergie [18]	16
Tableau 3.2 - Type de données fournies par les mesures de capteurs routier [15, 16].....	28
Tableau 3.3 - Performance des capteurs routier [15, 16].....	29
Tableau 3.4 - Facteurs environnementaux influant sur les capteurs routier [15, 16].....	31
Tableau 3.5 - Caractéristiques de certains capteurs commerciaux [4].....	32
Tableau 3.6 - Consommation du courant et temps de latence des nœuds capteurs [19]	38
Tableau 4.1 - Sommaire des caractéristiques du capteur <i>Phillips KMZ52</i> [35].....	47
Tableau 4.2 - Résultat du calcul des paramètres du trafic à partir de la figure 4.12.....	59
Tableau 4.3 - Répartition des résultats obtenus par les nœuds capteurs.....	60
Tableau 4.4 - Répartition des résultats obtenus par la caméra vidéo.....	60
Tableau 5.1 - Taux d'erreur de reconstruction des signaux.....	75
Tableau 5.2 - Taux de compression des signaux	76
Tableau 5.3 - Taux d'erreur de reconstruction des signaux.....	79

LISTE DES ACRONYMES

AMR : Anisotropic Magneto-Resistance
CAN : Convertisseur Analogique/Numérique
CIV : Communication Inter -Véhicule
CRV : Communication Route -Véhicule
ÉC : Échantillonnage Compressif
DSP : Digital Signal Processor
FFT : Fast Fourier Transform
GPS : Global Positioning System
IBM : International Business Machines
IEEE : Institute of Electrical and Electronics Engineers
MAC : Medium Access Control
MANET : Mobile Ad hoc Network
PDA : Personal Digital Assistant
RCSF : Réseau de Capteurs Sans Fil
TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TFD : Transformée de Fourier Discrète
USB : Universal Serial Bus
WLAN : Wireless Local Area Network
WPAN : Wireless Personal Area Network
WSN: Wireless Sensor Network

CHAPITRE 1 Introduction

Dans l'étude des voies de circulations terrestres, les réseaux de capteurs magnétiques sans fil apportent des solutions innovantes d'enregistrement de données qui permettent d'évaluer le débit, faire la classification du trafic et aussi estimer la vitesse de circulation des véhicules sur la route. L'utilisation de réseaux de capteurs sans fil dans ce cadre, se distingue de la plupart des systèmes classiques d'information routière (les détecteurs à boucle inductive, les systèmes radars, les systèmes lasers, les systèmes vidéo, les systèmes infrarouge, les systèmes acoustiques ou pneumatiques) par le faible coût, le niveau élevé de flexibilité de configuration, la capacité de déploiement à grande échelle, ainsi que la capacité de communication sans fil. Cependant, les capteurs sans fil doivent fonctionner de manière autonome pendant plusieurs mois ou plusieurs années tout en disposant des ressources limitées, particulièrement en termes d'énergie. Les communications radio étant souvent d'un ordre de grandeur plus coûteux en consommation d'énergie que les opérations du processeur [37], la conception de méthodes d'acquisition de données limitant le nombre de transmissions de données est devenue l'un des principaux défis soulevés par cette technologie.

Ce défi peut être abordé de manière efficace par l'utilisation des modèles mathématiques issus de la théorie de l'échantillonnage compressif. Ce dernier permet de tirer profit de certaines connaissances à priori sur le signal recherché, pour le reconstruire fidèlement à partir d'un nombre très réduit d'échantillons. Si une telle méthode peut être utilisée, d'importants gains en communication seront obtenus et par conséquent une augmentation de la durée de vie des capteurs sera possible. Parmi les connaissances à priori recherchées sur le signal, se trouve la parcimonie. C'est-à-dire trouver une base du signal où les quantités recherchées ont peu de coefficients non nuls. Ceci permet, avec l'échantillonnage compressif, et même sans savoir quels coefficients sont non nuls, de reconstruire fidèlement le signal à partir d'un nombre restreint de mesures.

L'échantillonnage compressif a déjà été appliqué avec succès à l'imagerie médicale [27], permettant par exemple de réduire significativement le nombre de mesures pour l'imagerie par

résonnance magnétique fonctionnelle. À ce jour, peu d'applications de l'échantillonnage compressif ont été proposées pour les réseaux de capteurs sans fil, laissant entrevoir ainsi un très grand nombre d'applications, comme la mesure du signal du champ magnétique terrestre pour la détection des véhicules sur un réseau routier.

Ce travail de recherche a pour objectif d'évaluer l'utilisation de cette nouvelle technique d'acquisition du signal pour la détection des véhicules par un réseau de capteurs sans fil. Pour une configuration d'acquisition du signal du champ magnétique terrestre, on envisagera une acquisition aléatoire d'un nombre moindre d'échantillons du signal; puis par une série de projections des échantillons de ce signal sur des vecteurs de base aléatoires, on utilisera des algorithmes optimisés pour reconstruire le signal. L'acquisition du signal par la théorie de l'échantillonnage compressif permettra aux capteurs sans fil d'acquérir le signal en le condensant dans une petite quantité de données, de limiter la quantité de transmission de données et de maximiser ainsi la durée de vie des capteur sans modifier la technologie et l'électronique associée.

Ce mémoire débutera par une revue de la littérature de la théorie de l'échantillonnage compressif et des réseaux de capteurs sans fil. Ensuite, nous présenterons la partie expérimentale du projet, comprenant les critères de choix et la présentation de la plateforme du réseau de capteur utilisé pour l'expérimentation de la détection de véhicules sur la chaussée, le paramétrage et leurs déploiements sur la chaussée pour effectuer l'expérimentation. L'analyse des signaux obtenus par ces capteurs sans fil sera ensuite présentée, suivie des simulations de reconstruction du signal par la technique de l'échantillonnage compressif. Une conclusion sera donnée quant à la pertinence de l'utilisation de l'échantillonnage compressif pour économiser sur les quantités de données à transmettre par les réseaux de capteurs magnétiques sans fil sur la chaussée.

CHAPITRE 2 L'échantillonnage compressif

2.1 Généralités

L'échantillonnage du signal est une étape essentielle dans tout concept de traitement numérique du signal. Ce dernier nous enseigne qu'un signal à bande limitée peut être reconstruit exactement à partir de ces échantillons, si celui-ci est échantillonné à une cadence d'au moins deux fois sa fréquence maximale (théorème d'échantillonnage de Nyquist). Ce principe est à la base de quasiment tous les protocoles d'acquisition utilisés dans les systèmes numériques modernes (l'électronique, la communication, l'audio-visuelle, les appareils d'imagerie médicaux, l'industrie, etc.). Ce procédé d'acquisition ne tient pas compte des signaux qui ne sont pas naturellement à bande fréquentielle limitée mais qui présentent tout de même un intérêt considérable malgré leurs faibles quantités de données non nulles dans le domaine temporel. C'est le cas des signaux magnétiques de détection de passage de véhicules sur la chaussée. Pour ce type de signaux, la fréquence d'échantillonnage n'est pas imposée directement par le théorème de Nyquist mais par la résolution temporelle désirée à pouvoir détecter le passage de tous les véhicules sur la chaussée. Cependant, c'est commun dans de tels systèmes d'utiliser un filtre passe-bas d'anti-repliement pour limiter la bande fréquentielle du signal avant l'échantillonnage, et donc le théorème de Nyquist joue un rôle implicite.

La théorie de l'échantillonnage compressif (CS pour *compressed/ive sensing* ou *sampling*), apparue il y a moins d'une décennie dans les travaux parallèles accomplis indépendamment par Candes, Romberg, Tao [6] [8] et Donoho [17] vient renouveler la vision de Nyquist de la théorie d'échantillonnage pour les signaux qui ne sont pas naturellement à bande fréquentielle limitée. Les auteurs [6, 7, 8, 17] proposent des techniques d'échantillonnage qui permettent de réduire le nombre de mesures nécessaires; nombre qui sera déterminé plus par la quantité d'information du signal que par son étendue fréquentielle.

L'approche exploite le fait que les signaux ayant une représentation parcimonieuse (c'est-à-dire le fait qu'il ait la combinaison d'un nombre réduit de coefficients non nuls) dans une certaine base Ψ peuvent être reconstruits à partir d'un nombre limité de projections sur une

deuxième base Φ , incohérente avec la première. La base Φ est dite incohérente avec Ψ si aucune de ses lignes n'admet de représentation parcimonieuse sur la base Ψ . De façon très intéressante, les projections aléatoires constituent des bases incohérentes avec toutes les bases « fixes ».

Dans ce chapitre, plusieurs développements ont été tirés de l'article scientifique : *An introduction to compressive sampling* [7] et est organisé comme suit :

- La section 2.2 présente la problématique liée à l'acquisition des données, l'échantillonnage des signaux et leur modélisation.
- Les sections 2.3 et 2.4 introduisent les deux prémices fondamentales de l'échantillonnage compressif : la parcimonie et l'incohérence.
- La section 2.5 présente le caractère aléatoire et non adapté dans la construction des matrices d'acquisition utilisées dans l'échantillonnage compressif.
- La section 2.6 donne une récapitulation de la méthode d'échantillonnage basée sur ce nouveau protocole.
- Et nous terminons dans la section 2.7 sur l'intérêt d'utiliser l'échantillonnage compressif pour la détection de véhicules par un réseau de capteurs sans fil.

2.2 Paradigme d'acquisition de données

Dans cette section, on discutera le mécanisme d'acquisition dans lequel l'information à propos d'un signal $f(t)$ est obtenue par :

$$y_k = \langle f, \varphi_k \rangle \quad (2-1)$$

$k = 1, \dots, m$ avec m le nombre de mesures effectuées

Dans l'équation (2.1), on effectue simplement la corrélation du signal f que nous souhaitons acquérir avec les formes d'ondes $\varphi_k(t)$. Ceci est une organisation standard pour l'acquisition.

Si les formes d'ondes d'acquisition sont par exemple les impulsions de Dirac, alors y est un vecteur de valeurs échantillonnées de f dans le domaine temporel.

Si les formes d'onde d'acquisition sont des sinusoides, alors y est un vecteur de coefficients de Fourier.

En s'intéressant aux situations de sous-échantillonnage dans lesquelles le nombre de mesures disponibles m est beaucoup plus petit que le nombre n qui représente la dimension du signal f , des problèmes révèlent des questions importantes :

- Est-ce qu'une reconstruction précise à partir de m ($\ll n$) mesures seulement est possible ?
- Est-ce possible de concevoir m ($\ll n$) formes d'ondes d'acquisition pour capturer presque toute l'information de f ?
- Et comment peut-on rapprocher f à partir de cette information ?

Il est vrai que cette situation est plutôt décourageante, c'est un problème inverse mal posé. On a à résoudre un système d'équations linéaire sous-dimensionné.

D'une façon formelle :

Soit A une matrice de dimensions $m \times n$ représentant la matrice d'acquisition avec les vecteurs $\varphi_1^*, \dots, \varphi_m^*$ comme ligne. ($*$ étant l'opération de transposition complexe).

Le problème de trouver $f \in R^n$ à partir de $y = A \cdot f \in R^m$, est en général mal posé quand $m < n$. En effet, il y'a une infinité de candidats f pour lesquels $A \cdot f = y$.

Mais on pourrait imaginer peut être une issue en supposant des modèles ou classes réalistes de signaux f qui existent naturellement [7].

La théorie de Nyquist nous dit que si $f(t)$ a une largeur de bande limitée, alors un nombre d'échantillons (uniformément acquis) suffiront pour la reconstruction des signaux.

Candès et Wakin [7] montrent que la reconstruction du signal est en effet possible pour une classe beaucoup plus large des signaux.

2.3 La parcimonie

De nombreux signaux naturels sont pour diverses raisons, parcimonieux ou presque parcimonieux, c'est-à-dire qu'ils peuvent être décrits ou approximés de façon plus compacte que leur représentation classique : après un changement de base judicieux, le nombre de coefficients non nuls est très faible par rapport à la dimension de l'espace dans lequel ils vivent. La figure 2.1 montre un signal dont la représentation temporelle a peu de coefficients nuls, mais la transformée de Fourier a un support de taille très réduite.

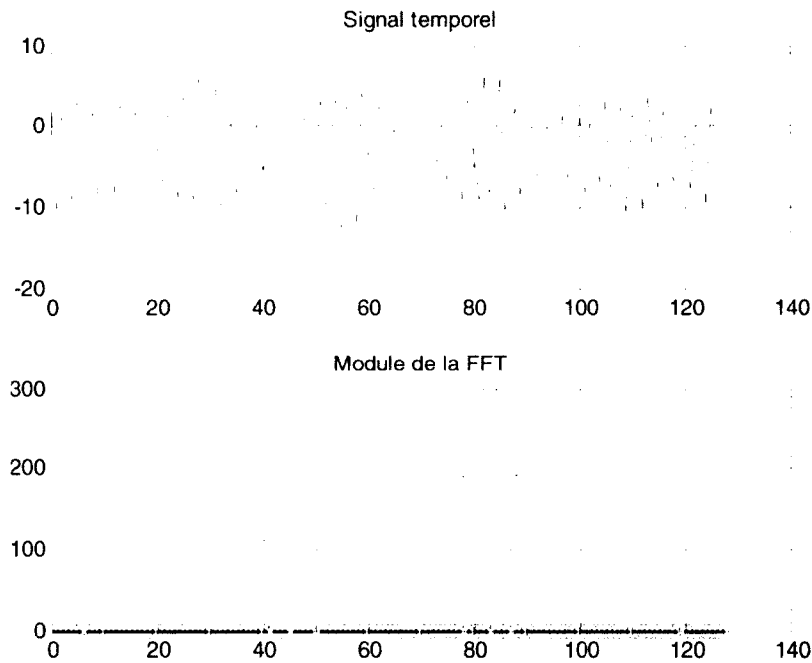


Figure 2.1 – Un signal temporel parcimonieux dans la base de Fourier

Candès et Wakin [7] montrent dans l'équation (2-2), l'expansion dans une base orthonormée (telle une base de Fourier) $\Psi = [\Psi_1 \Psi_2 \dots \Psi_n]$, d'un signal temporel f de dimension n (f est un vecteur $n \times 1$: $f \in \mathbb{R}^n$) :

$$f(t) = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \psi_i(t) \quad (2-2)$$

où $x_i = \langle f, \psi_i \rangle$ sont les coefficients de f dans Ψ .

En prenant x la séquence des coefficients x_i de f , il sera commode d'exprimer f par :

$$f = \Psi^* \cdot x = \Psi^{-1} \cdot x \quad (2-3)$$

où Ψ est la matrice de dimension $n \times n$ avec $\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_n$ comme colonnes.

On définit les signaux parcimonieux et quasi-parcimonieux de la manière suivante :

- On dit que f est S -parcimonieux si son support est un petit ensemble de coefficients d'indices $\Omega \subset \{1, \dots, n\}$ de cardinalité S ($Card(\Omega) = |\Omega| = S$).
- On dit que f est quasi-parcimonieux (compressible) si f est concentré sur un petit ensemble $T_0 \subset \{1, \dots, n\}$ composé des S plus grands coefficients de f tel que :

$$\|f(t) - f_S(t)\|_{l_2} < \varepsilon \quad (2-4)$$

($\varepsilon \in \mathbb{R}^{++}$ est le seuil fixé selon l'application) avec :

$$f_S(t) := \sum_{i \in T_0} x_i \cdot \psi_i(t) \quad (2-5)$$

ou en écriture matricielle :

$$f_S := \Psi^{-1} \cdot x_S \quad (2-6)$$

$f_S(t)$ est ainsi obtenu en gardant seulement les coefficients qui correspondent aux S plus grandes valeurs de x_i dans l'expansion (2-2).

x_S est alors le vecteur de coefficients (x_i) dans lequel tous les coefficients sont mis à zéro à l'exception des S plus grands. Ce vecteur est parcimonieux au sens strict puisque peu de ses coefficients sont non nuls. Puisque Ψ est une base orthonormée, on a :

$$\|f - f_S\|_{l_2} = \|x - x_S\|_{l_2} \quad (2-7)$$

Si x est parcimonieux, alors x est bien approximé par x_S d'où l'erreur $\|f - f_S\|_{l_2}$ est petite.

L'implication de la parcimonie est maintenant claire : un signal est dit parcimonieux lorsque la plupart de ses coefficients sont (approximativement) nuls dans une base quelconque. De ce fait, on peut rejeter les petits coefficients sans beaucoup de perte perceptuelle du signal.

2.4 L'échantillonnage incohérent

Supposons qu'on a une paire de bases orthonormées (Φ, Ψ) de R^n . La première base Φ est utilisée pour l'acquisition du signal f et la deuxième Ψ est utilisée pour représenter f . La cohérence entre la base Φ où le signal est mesuré et la base Ψ où il est parcimonieux est [7]:

$$\mu(\Phi, \Psi) = \sqrt{n} \cdot \max_{1 \leq k, j \leq n} |\langle \phi_k, \psi_j \rangle| \quad (2-8)$$

La cohérence mesure la plus grande corrélation entre n'importe quelles des deux colonnes de Φ et Ψ . De l'algèbre linéaire, on peut déduire que $\mu(\Phi, \Psi) \in [1, \sqrt{n}]$. Plus Φ et Ψ contiennent des éléments corrélés, plus la cohérence est grande.

L'échantillonnage compressif trouve son intérêt avec des paires de bases fournissant une faible cohérence. Si nous prenons par exemple Φ la base canonique $\phi_k(t) = \delta(t - k)$, et Ψ la base de Fourier, $\psi_j = n^{-1/2} \cdot e^{i2\pi jt/n}$. Puisque Φ est la matrice d'acquisition, ceci correspond à l'arrangement d'échantillonnage classique dans le temps. La paire de temps-fréquence donne une cohérence $\mu(\Phi, \Psi) = 1$ et donc on trouve le maximum d'incohérence.

2.5 La reconstruction des signaux parcimonieux

Suivant le théorème de Nyquist, on aimerait acquérir n échantillons de f , mais selon le protocole de l'échantillonnage compressif, on acquiert qu'un sous ensemble de ceux-ci :

$$y_k = \langle f, \phi_k \rangle \quad k \in M \quad (2-9)$$

Où $M \subset \{1, \dots, n\}$ est un sous ensemble de cardinal $m < n$.

Pour reconstruire la représentation parcimonieuse de f , on a à résoudre un problème d'optimisation. Soit x^* le vecteur pour lequel $y = \Psi \cdot \Phi \cdot x^*$. Pour imposer que les signaux reconstruits soient parcimonieux, une approche naturelle est d'imposer que la norme l_0 (définie comme étant le nombre de composants non nuls) des signaux reconstruits soit minimale :

$$\min_{x \in R^n} \|x\|_{l_0} \quad \text{tel que} \quad y_k = \langle \phi_k, \Psi x \rangle \quad \forall k \in M \quad (2-10)$$

Le terme $\|\tilde{x}\|_{l_0}$ (norme l_0 de \tilde{x}) n'est autre que le nombre de composants non nuls du vecteur \tilde{x} .

Davis, Mallat et Avellaneda montrent [20] que cette contrainte mène à des algorithmes NP-difficiles, dont la complexité exponentielle rend l'usage impraticable pour les valeurs réalistes de n .

Cependant, la contrainte sur la norme l_0 peut être relaxée en imposant que la norme l_1 des signaux reconstruits soit minimale. Certes la norme l_1 offre une solution moins optimale que la norme l_0 , mais présente l'avantage d'être calculable par des techniques de programmation linéaire.

Candès, Romberg et Tao [6] ont montré qu'un signal parcimonieux peut être exactement reconstruit à partir de m mesures en résolvant l'algorithme :

$$\min_{\tilde{x} \in \mathbb{R}^n} \|\tilde{x}\|_{l_1} \quad \text{tel que } y_k = \langle \varphi_k, \Psi \tilde{x} \rangle \quad \forall k \in M \quad (2-11)$$

La seule différence entre les équations (2-10) et (2-11) est qu'on remplace la taille du support (nombre de composants non nuls) par la somme des valeurs absolues de ces composants.

L'équation (2-11) peut donc être reformulée en un programme linéaire et résolu par une des techniques appropriées. Même si les équations (2-10) et (2-11) sont fondamentalement différentes, elles produisent la même réponse dans beaucoup de situations intéressantes, au prix d'un nombre de mesures y_k , un peu plus élevé pour (2-11).

Mais pourquoi la minimisation selon la norme l_1 est un substitut efficace pour promouvoir la parcimonie? Baraniuk montre dans [3] l'efficacité de la norme l_1 par rapport à la norme l_2 . La figure 2.2 donne une explication géométrique en regardant dans un espace \mathbb{R}^2 .

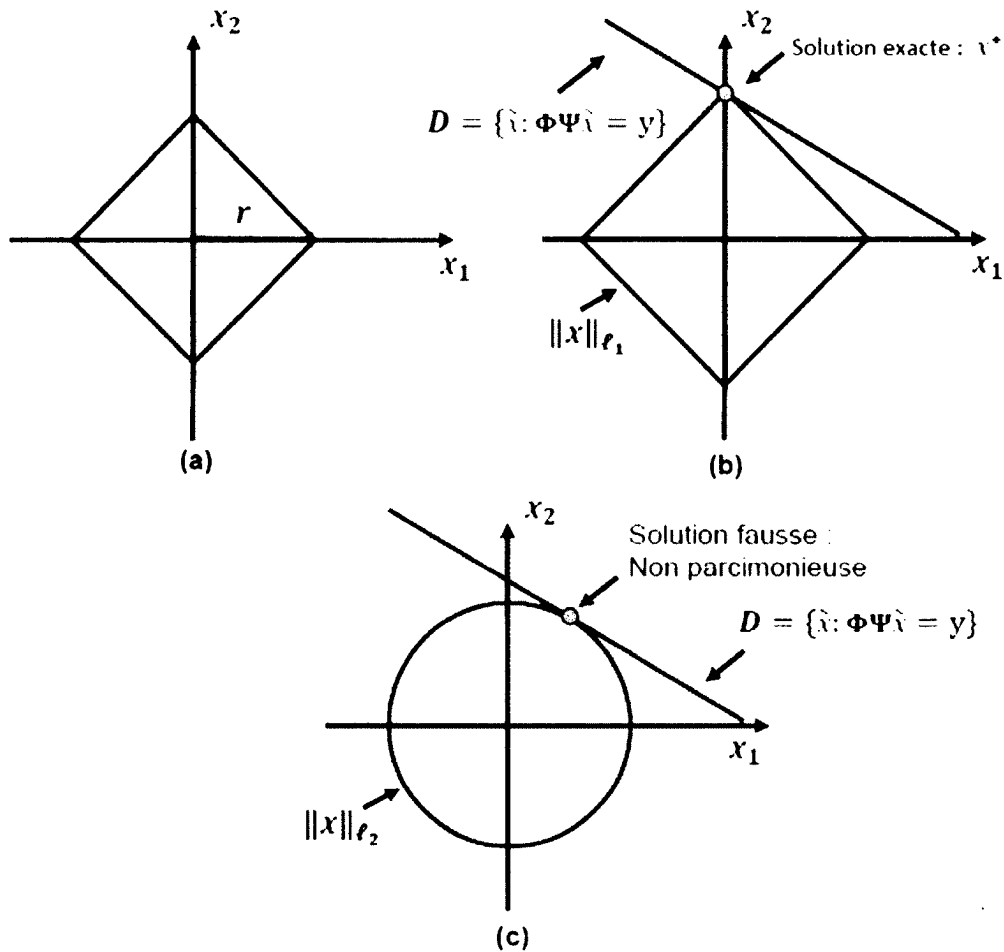


Figure 2.2 – Exemple de la minimisation dans R^2 par les normes l_1 et l_2

La partie (a) illustre une boule, selon la norme l_1 , de rayon r dans R^2 (R est l'ensemble des réels). Remarquons qu'elle est anisotrope (L'anisotropie : contraire d'isotropie est la propriété d'être dépendante de la direction. Un objet anisotrope pourra présenter des caractéristiques différentes selon la direction). Cette boule est « pointue » le long des axes (à comparer de la norme euclidienne l_2 dans (c), qui est circulaire et donc complètement isotrope).

La partie (b) présente le procédé de résolution (également en R^2) : le point marqué x^* est un vecteur parcimonieux (une seule de ses composantes est différente de zéro). La droite D est l'ensemble des \tilde{x} qui partagent la même valeur de mesure y .

Résoudre l'équation (2-11) consiste à trouver le point sur cette droite ayant la plus petite norme l_1 . Pour visualiser comment l'équation (2-11) accomplit cette tâche, imaginez une boule (selon la norme l_1) de rayon r , élargissez son rayon progressivement jusqu'à ce qu'elle rencontre D. Ce premier point d'intersection est par définition le vecteur-solution de l'équation (2-11).

La combinaison de l'anisotropie de la boule (selon norme l_1) et la planéité de l'espace D (linéarité dans R^2) résulte du fait que cette intersection se produise à l'un des points, précisément là où les vecteurs parcimonieux sont situés.

Comparer ceci à ce qui se passerait si on remplace la norme l_1 , par la norme l_2 (ce qui rendrait la reconstruction un problème de moindres carrés). La figure 2.3 (c) remplace la forme du losange de la boule selon la norme l_1 par la forme sphérique et parfaitement isotrope de la boule selon la norme l_2 . On peut voir que le point de la première intersection de D avec la boule selon la norme l_2 en expansion, ne doit pas être parcimonieux du tout. Dans ces espaces de dimensions plus grandes, cette différence devient dramatique.

Malgré que la différence dans les définitions des normes l_1 et l_2 est petite (somme des coefficients en valeur absolue par rapport à la somme des carrés des coefficients), les minimisations selon l'une ou l'autre se comportent de façons totalement différentes.

2.6 Le théorème fondamental de l'échantillonnage compressif

Soit $f \in R^n$ avec f , S -parcimonieux dans la base Ψ . Soit m le nombre de mesures effectuées, choisies aléatoirement selon une loi uniforme dans une base Φ . Si on a :

$$m \geq C \cdot \mu^2(\Phi, \Psi) \cdot S \cdot \log(n) \quad (2-12)$$

Pour une certaine constante positive C , la solution (2-11) est exacte avec une très grande probabilité.

Tel que expliqué par Candès et Wakin [7], on note trois observations :

- Le rôle de la cohérence est complètement transparent, une cohérence faible signifie que moins d'échantillons sont nécessaires, d'où l'importance du choix d'un couple de

bases de faible cohérence.

- On ne subit pas de perte d'information en mesurant, à peu près, n'importe quel ensemble de m coefficients ($m < n$). Si $\mu(\Phi, \Psi)$ est égale ou proche de un, alors un nombre d'échantillons de l'ordre de $S \cdot \log(n)$ suffit au lieu de n .
- Le signal f peut être exactement récupéré à partir d'un petit ensemble de données en minimisant un problème convexe, qui ne demande aucune connaissance à priori sur le nombre de composantes non nulles de x , leurs emplacements ou leurs amplitudes; toutes ces données sont supposées inconnues à priori.

Un algorithme de reconstruction convenable peut assurer une reconstruction exacte du signal à condition qu'il soit suffisamment parcimonieux.

Le théorème suggère en effet un protocole d'acquisition très pratique: échantillonner aléatoirement dans un domaine incohérent et utiliser la programmation linéaire après l'étape d'acquisition pour faire la reconstruction.

En utilisant ce protocole, on aura effectivement acquis le signal dans une forme compressée. Pour le "décompresser", il nous faut un décodeur, qui est assuré par la minimisation selon la norme l_1 .

La figure 2.3 présente les diverses représentations d'un signal : un signal f , possédant une représentation x avec une parcimonie S dans une certaine base Ψ , est échantillonné par une partie d'une base Φ , incohérente avec Ψ . À partir de ces échantillons y choisis aléatoirement selon une loi uniforme dans la base Φ , il est possible de retrouver la forme creuse x par l'utilisation des méthodes d'optimisation convexe.

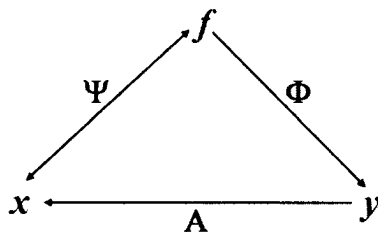


Figure 2.3 - Diverses représentations d'un signal

2.7 Intérêt de l'ÉC pour la détection de véhicules par les RCSF

Enregistrer les signaux du champ magnétique terrestre pour la détection des véhicules, requiert au capteur sans fil (nœud capteur) de l'échantillonner par exemple dans certaines conditions à 20 Hz (comme dans l'expérimentation effectuée au chapitre 4 de ce document), afin de ne pas rater le passage d'un véhicule. Ce processus d'acquisition massive de données suivi de la transmission est très gaspillant en termes d'énergie, et on peut se retrouver rapidement avec des fichiers assez lourds à traiter et à stocker au centre de traitement si la séquence de mesure dure plusieurs heures et qu'on a des dizaines voire des centaines de nœuds capteurs sur la chaussée.

La théorie du l'échantillonnage compressif affirme qu'on peut reconstruire pour des signaux parcimonieux comme le cas de ces signaux, à partir d'un nombre moindre d'échantillons ou de mesures que celui exigé par les méthodes conventionnelles. Les techniques d'acquisition de l'échantillonnage compressif fonctionnent très différemment. Elles fonctionnent comme s'il était possible d'acquérir directement seulement les informations importantes du signal d'intérêt. En prenant des échantillons aléatoires (mesures) de l'ordre de $S \cdot \log(n)$ (S étant très petit devant n) au lieu de n , on aura suffisamment d'informations pour reconstruire le signal.

En d'autres termes, les protocoles de mesure selon les techniques de l'échantillonnage compressif traduisent essentiellement les données analogiques sous forme numérique ayant déjà subi la compression, afin que l'on puisse obtenir des signaux à partir de quelques mesures. Tout ce qui est nécessaire après l'étape d'acquisition et de transmission au niveau du centre de traitement, est de faire la décompression des données mesurées.

CHAPITRE 3 Les réseaux de capteurs sans fil

Grâce aux progrès technologiques des ordinateurs portables, des téléphones cellulaires, des PDA, des appareils GPS, les appareils informatiques sont devenus moins chers, plus mobiles, plus distribués et plus omniprésentes dans la vie quotidienne. Il est maintenant possible de concevoir des composants intégrés de très petit volume ayant la capacité des ordinateurs des années 90. Ces systèmes embarqués peuvent être pris en charge par les systèmes d'exploitation revus à la baisse de Windows ou Linux. Dans cette perspective, l'émergence de réseaux de capteurs sans fil est essentiellement la dernière tendance vers la miniaturisation et l'ubiquité des dispositifs informatiques.

Dans ce chapitre, on présentera d'abord de façon générale, les fonctionnalités des réseaux de capteurs sans fil, ensuite leurs applications dans la gestion du trafic routier et leurs motivations par rapport aux autres technologies de détection de véhicules. À la fin du chapitre, on fera une analyse sur la consommation d'énergie des capteurs sans fil (nœuds) afin de bien comprendre la nécessité de l'utilisation de la technique de l'échantillonnage compressif pour la détection de véhicules.

3.1 Définition

Un réseau de capteurs sans fil, plus connu sous le nom de *wireless sensor network (WSN)* est un ensemble de dispositifs très petits, intelligents et autonomes appelés nœuds capteurs ou tout simplement nœuds [1]. Le déploiement de plusieurs d'entre eux, en vue de collecter, traiter et de transmettre à l'aide d'une connexion sans fil, les données environnementales forme un réseau de capteurs sans fil.

3.2 Anatomie d'un nœud capteur

Un nœud capteur est un véritable système embarqué, composé de quatre modules de base : un module d'acquisition de données, un module de traitement, un module de communication et un module d'alimentation. Dans certaines applications, le nœud capteur peut être équipé de

modules supplémentaires tels qu'un système GPS pour la localisation et d'une cellule solaire pour générer de l'énergie [42].

3.2.1 Le module d'acquisition

Le module d'acquisition permet de collecter les signaux. Il est généralement constitué de deux sous-unités : des capteurs classiques combinés à des convertisseurs analogique/numérique (CAN) [48]. Le signal analogique, généré par le phénomène observé et mesuré par un capteur est converti en un signal numérique par le convertisseur analogique-vers-numérique et transmis au module de traitement.

Grâce aux progrès de la technologie des *MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)* [13], il est maintenant possible d'intégrer plusieurs capteurs dans un seul petit circuit intégré. Ainsi, dans les applications de systèmes de transports intelligents avancés, le module d'acquisition de données peut disposer :

- d'un capteur magnétique pour détecter la présence ou le passage de véhicules sur un réseau routier;
- d'un capteur de température pour détecter la présence de la glace ou la neige sur la chaussée;
- d'un capteur d'humidité pour détecter la pluie ou le brouillard;
- d'un accéléromètre pour le suivi des structures des chaussées et des ponts.

3.2.2 Le module de traitement

Le module de traitement est composé d'un microcontrôleur, généralement associé à un périphérique de stockage de taille réduite et fonctionnant à l'aide d'un système d'exploitation conçu spécialement pour les micro-capteurs. Ce module est à la base du calcul binaire et du stockage temporaire pour les données. Il est également chargé d'exécuter les protocoles de communications qui permettent de faire collaborer le nœud capteur avec les autres nœuds du réseau.

3.2.3 Le module de communication

La connexion du nœud au réseau est gérée par le module de transmission. Ce dernier peut être sous la forme d'un composant optique actif ou passif (comme dans le cas des nœuds *smart dust*), ou un composant basé sur les radiofréquences. La communication par radiofréquence est basée sur la génération, la propagation et la détection d'ondes électromagnétiques, ce qui nécessite non seulement la complexité du module de transmission par des modules de modulation, de filtre passe-bande et de démodulation mais aussi un coût élevé de leur production [48]. Toutefois, ce mode de communication reste le mode préféré dans la plupart des projets de recherche menés sur les réseaux de capteurs, car les paquets échangés dans ces réseaux ont une grande portée de communication; ce qui implique très souvent, une grande consommation d'énergie du nœud capteur [48].

3.2.4 Le module d'alimentation énergétique

Le module d'alimentation énergétique est responsable de répartir l'énergie disponible aux autres modules. Ce module peut aussi gérer des systèmes de rechargement d'énergie à partir de l'environnement observé telles que les cellules solaires, afin d'étendre la durée de vie totale du réseau. Le tableau 3.1 donne un résumé de la performance énergétique de différents types de batteries qu'on utilise comme module d'alimentation énergétique dans un nœud capteur.

Tableau 3.1 - Évaluation énergétique de quelques sources d'énergie [18]

Types de batteries	Alcaline	Zinc-air	Lithium - Ion	Pile à combustible	Cellule solaire
Unités	J/Cm ³	J/Cm ³	J/Cm ³	J/Cm ³	mW/Cm ²
Évaluation énergétique	1190	3780	2880	8900	15

Après leur déploiement, les nœuds capteurs sont généralement inaccessibles, de ce fait, la durée de vie du réseau dépend complètement de celle de la source d'énergie du nœud capteur. Celle-ci est influencée considérablement par la contrainte de taille des nœuds.

3.2.5 Composants additionnels

Un nœud capteur peut dans certaines applications contenir d'autres modules comme le GPS [25,42] afin de permettre à l'opérateur de connaître leur position géographique. La conception des nœuds capteurs peut aller jusqu'à prévoir un système de mobilisation du nœud capteur pour le déplacer en cas de nécessité. En outre, s'il est nécessaire qu'un nœud capteur soit maintenu en activité pendant une très longue période de temps, un générateur d'énergie, tel que des cellules solaires pourraient être utiles.

Tous ces modules peuvent exiger leur intégration dans un boîtier de taille minimale inférieure à un centimètre cube, et avec un poids très léger permettant aux nœuds de rester dans les environnements hostiles, si l'application l'exige. La figure 3.1 présente les différents composants que peuvent avoir un nœud capteur.

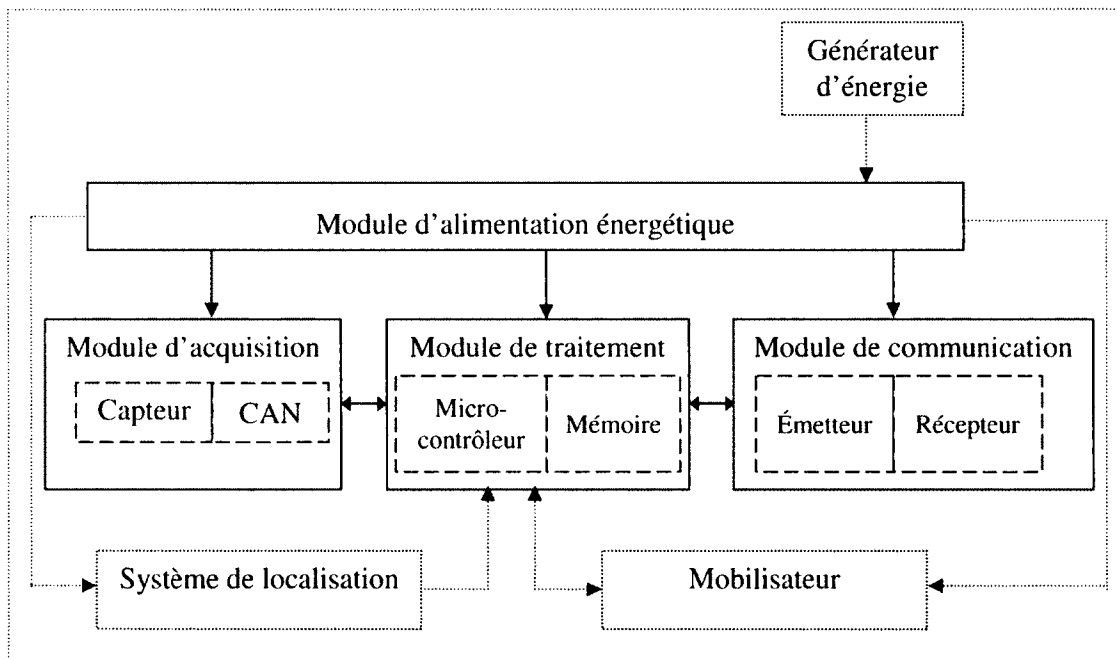


Figure 3.1 - Composants d'un nœud capteur adapté de [1]

3.3 Architecture de communication d'un RCSF

Les réseaux de capteurs sans fil sont une particularité de réseaux mobiles ad hoc (MANET) [39] qui ont récemment suscité beaucoup d'intérêt et de visibilité en raison de leur flexibilité et la faisabilité de leur déploiement à faible coût. En général, les réseaux mobiles ad hoc dépendent de protocoles de communication *peer-to-peer* (point à point) qui ne nécessitent pas une infrastructure fixe tels que les serveurs centralisés et les points d'accès.

Les réseaux de capteurs sans fil sont différents de leurs homologues ad hoc sans fil traditionnels (composé d'ordinateurs portables et PDA) en ce sens qu'ils ont une plus grande échelle, une densité plus élevée, des appareils plus petits, et une interaction avec un environnement physique. La conservation de l'énergie est critique dans les réseaux de capteurs sans fil en raison de leur faible capacité énergétique car ils sont alimentés par des batteries généralement non rechargeables. Pour optimiser les ressources énergétiques dans certaines applications, les nœuds capteurs doivent garder leurs modules de communications éteints pendant de très longues périodes et être actif pour envoyer leurs données à une station de base; ce qui favorisera la durée de vie du nœud capteur. Par contre, pour d'autres applications comme celle de la détection de véhicules sur un trafic routier très dense, les modules de communications des nœuds capteurs doivent rester la plupart de temps allumés. La figure 3.2 présente une architecture de communication d'un réseau de capteurs sans fil.

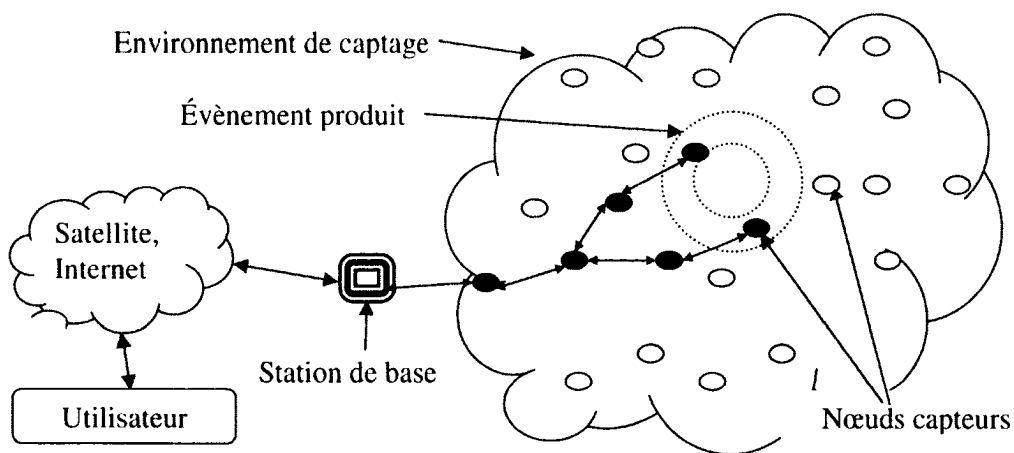


Figure 3.2 - Architecture de communication d'un RCSF [1]

Dans cette architecture de communication, chaque nœud capteur a la possibilité de collecter les données et de les router vers la station de base. Ce dernier est un point de collecte de données capturées. Il peut communiquer les données collectées à l'utilisateur final à travers un réseau de communication, éventuellement l'Internet. L'utilisateur peut à son tour, utiliser la station de base comme passerelle, afin de transmettre ses requêtes au réseau, précisant le type de données requises.

3.4 Architecture protocolaire d'un RCSF

L'architecture de la pile de protocole [1] des réseaux de capteurs sans fil diffère légèrement du modèle de référence OSI (Open System Interconnexion). Cette pile prend en charge le problème de consommation d'énergie, intègre le traitement des données transmises dans les protocoles de routage et facilite le travail coopératif entre les nœuds capteurs [1]. Elle est composée de la couche application, transport, réseau, liaison de données, physique, ainsi que de trois niveaux qui sont : le niveau de gestion d'énergie, de gestion de tâches et le niveau de gestion de mobilité.

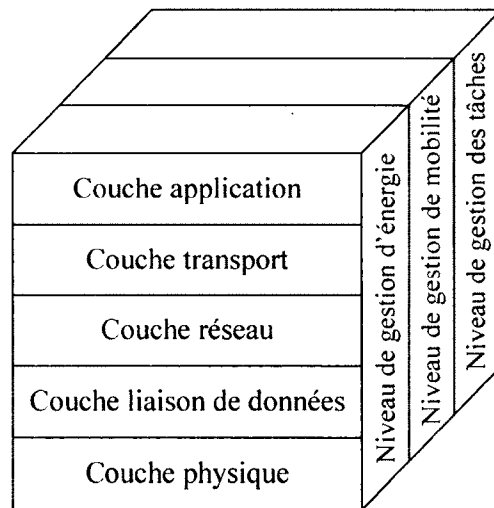


Figure 3.3 - Architecture protocolaire des réseaux de capteurs sans fil adapté de [1]

La couche application assure l'interface avec les applications. Il s'agit donc de la couche la plus proche des utilisateurs, gérée directement par les logiciels.

La couche transport est essentiellement présente pour constituer une interface entre la couche application et la couche réseau. Ses principaux objectifs sont:

- multiplexer et démultiplexer les messages entre les applications et la couche réseau ;
- contrôler les données ;
- réguler la quantité des données injectées dans le réseau.

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

La couche liaison de données est principalement responsable de :

- multiplexer le flux de données ;
- détecter et verrouiller les trames de données ;
- contrôler l'accès au support de transmission (Media Access Control) ;
- assurer une connexion fiable (point-à-point ou point-à-multipoints) selon la topologie du réseau de capteurs ;
- contrôler les erreurs.

La couche physique est responsable de :

- la sélection des fréquences ;
- la génération des ondes porteuses ;
- la détection du signal ;
- la modulation et le cryptage des données.

Le niveau de gestion d'énergie gère de manière efficace la consommation d'énergie du nœud capteur. Par exemple, pour éviter qu'un nœud capteur reçoive plusieurs fois le même message, il sera désactivé dès qu'il aura reçu le premier message. En outre, si le nœud capteur ne possède plus assez d'énergie, il enverra un message aux nœuds capteurs avec qu'ils communiquent pour ne plus recevoir de messages afin de conserver l'énergie restante pour l'acquisition et de traitement de données.

Le niveau de gestion de mobilité détecte et enregistre tous les mouvements des nœuds capteurs, de manière à leur permettre de garder continuellement une route vers l'utilisateur

final et maintenir une image récente des nœuds voisins. Cette image est nécessaire pour pouvoir équilibrer l'exécution des tâches et la consommation d'énergie.

Dans certaines applications, tous les nœuds capteurs constituant le réseau ne fonctionnent pas au même rythme. En fonction de leur niveau d'énergie, certains nœuds capteurs effectuent la tâche de détection plus que d'autres. De ce fait, le niveau de gestion des tâches assure l'équilibrage et la distribution des tâches sur les différents nœuds du réseau, afin d'assurer un travail coopératif et efficace en matière de consommation d'énergie et par conséquent, prolonger la durée de vie du réseau.

3.5 Application des réseaux de capteurs sans fil

La recherche dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil est en train de vivre une révolution importante, ouvrant des perspectives d'impacts significatifs dans de nombreux domaines. Plusieurs types d'applications peuvent être développés selon le mode de mesures et de communication des données. On peut ainsi classer les applications des réseaux de capteurs sans fil en quatre classes d'applications : orientées requêtes (*query driven*), orientées événements (*event driven*), temporelles (*time driven*) et hybride [31,46].

3.5.1 Application orientée requête

L'application orientée requête est basée sur un jeu d'interaction entre les nœuds et l'utilisateur. Ce dernier émet des requêtes dans un langage approprié. Chaque requête est diffusée sur le réseau pour récupérer les données souhaitées à partir des nœuds basés sur la description dans la requête. Les requêtes peuvent être envoyées sur demande ou à des intervalles de temps fixes; c'est le cas des applications qui nécessitent un suivi fin des milieux physiques soumis à des conditions critiques telles que les incendies, fuites de gaz ou des explosions [40]. On utilise également cette classe d'application pour la surveillance de troupeaux de bétail : chaque animal est équipé d'un nœud ; ceci permet de connaître en temps réel leur position afin d'éviter aux éleveurs d'avoir recours à des chiens de berger [24].

Cependant, il peut être difficile de spécifier un sous-ensemble de nœuds ayant un impact significatif sur la réponse de la requête.

3.5.2 Application orienté évènement

Dans une application orientée évènement, tout nœud peut générer une alarme lors d'un évènement important par un changement d'état. C'est le cas des réseaux de capteurs sans fil utilisés pour des applications militaires, servant à détecter l'invasion des forces ennemies [41]. On retrouve également ce type d'application dans le domaine sanitaire où un réseau de capteurs sans fil sont placés sur un patient pour détecter le comportement anormale de ses états physiologiques [29].

Pour cette classe d'application, les nœuds sont préconfigurés avec des valeurs seuils qui indiquent un évènement lorsque les nœuds acquièrent des signaux supérieurs ou dépassant les valeurs seuils. La classe d'applications orientés évènements présente les avantages suivants :

- ils réduisent le nombre de communication de données en appliquant un filtrage local sur les données recueillies afin de déterminer s'il convient ou non d'envoyer de nouvelles données;
- ils exploitent la redondance de réduire le nombre de fausses alarmes,
- ils permettent des réponses rapides à des événements détectés ;
- ils sont faciles à implémenter et à configurer;
- ils permettent un traitement distribué au niveau du nœud ou dans un groupe de nœuds à détecter un évènement en collaboration ;
- ils sont adaptés pour le temps applications critiques, par exemple la surveillance des incendies de forêt [2] ou la détection de détérioration des édifices [49].

Cependant, il y'a un certain nombre de limitations à cette classe d'application :

- en raison du fait que les événements se produisent aléatoirement, certains nœuds peuvent générer un taux de données plus élevé que d'autres nœuds du réseau. Ceci conduirait à une charge de travail déséquilibrée entre les nœuds;
- cette classe n'est pas adaptée pour les applications de surveillance en continu, où les mesures détectées changent graduellement et continuellement telles le cas de la détection de véhicules sur la chaussée ;

- en raison d'imprécisions des capteurs de mesure, cette application pourrait potentiellement générer des fausses alarmes.

3.5.3 Application temporelle

Dans le cas d'une application temporelle, le nœud acquiert et envoie des signaux à des intervalles de temps fixe. Ce dernier peut être préconfiguré ou fixé par l'utilisateur en fonction de la nature et des exigences de l'environnement surveillé, c'est le cas par exemple d'un réseau de capteurs sans fil déployés dans un champ pour mesurer de manière périodique l'humidité du sol, qui est un facteur important pour le développement des cultures [46].

Cette classe d'application présente l'avantage de réduire la congestion et d'améliorer la fiabilité du réseau en programmant les nœuds à transmettre à des moments différents. Cependant, une grande partie de données renvoyées par les nœuds pourraient être redondant et inutile pour l'utilisateur final ; ce qui entraîne un gaspillage de ressources. L'utilisation de la technique de l'échantillonnage compressif peut être un atout pour ce type d'application dont les signaux capturés présentent des propriétés de parcimonie car il permettrait de réduire le gaspillage de ressources en réduisant le nombre d'acquisition et de transmission de données. La conciliation de l'application temporelle et de la technique de l'échantillonnage compressif peut être intéressante dans certains domaines comme la détection de véhicules sur la chaussée.

3.5.4 Application hybride

L'application hybride est une approche qui combine les fonctionnalités de deux ou plusieurs classes d'applications décrites ci-dessus. Cette classe application vise à minimiser l'effet des inconvénients des catégories individuelles décrites ci-dessus. Elle peut être utilisée pour le contrôle de la pollution : plusieurs nœuds capteurs dispersés au-dessus d'un emplacement industriel pour détecter et contrôler des fuites de gaz ou de produits chimiques. Cette application permet de donner l'alerte en un temps record et de pouvoir suivre l'évolution de la catastrophe [5].

3.6 Les RCSF utilisés pour la gestion du trafic routier

Dans l'étude du trafic routier, les capteurs sans fil (nœuds capteurs) sont intégrés dans le revêtement de la chaussée pour détecter le passage d'un véhicule en mesurant les variations des signaux du champ magnétique terrestre, grâce au magnétomètre intégré dans le nœud. Ce dernier transfère ensuite les informations à la station de base qui peut être installée sur un mât situé de l'autre côté de la route. La station de base a pour rôle de collecter les données en provenance des nœuds capteurs et de les transmettre via Internet ou satellite aux systèmes informatiques du centre de traitement de gestion du trafic pour d'éventuelles analyses afin de prendre des décisions adéquates. La figure 3.4 [43] présente une application d'un réseau de capteur sans fil utilisé pour la gestion du trafic routier.

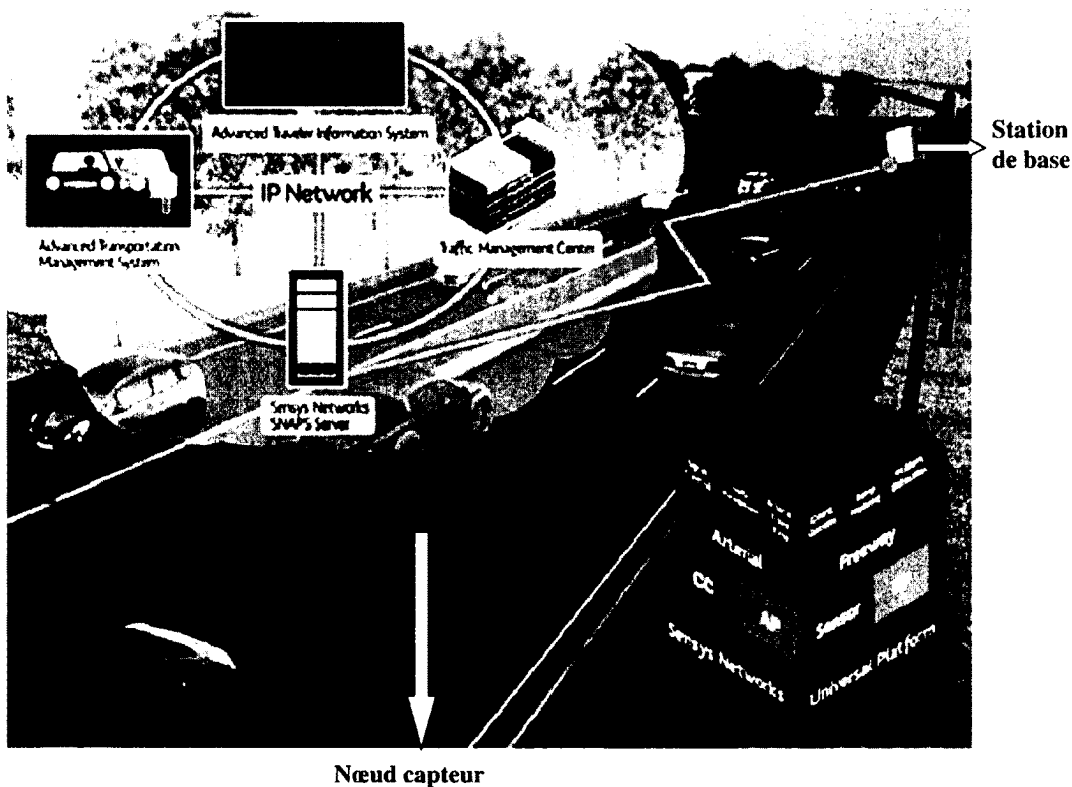


Figure 3.4 - Application d'un RCSF pour la gestion du trafic routier [43]

Sensys networks est une compagnie américaine spécialisée dans la gestion du trafic routier à partir des réseaux de capteurs sans fil. Plusieurs villes (San Francisco, New Jersey, Saint louis,

Los Angeles, Seattle, Baltimore, etc.) utilisent les réseaux de capteurs sans fil de cette compagnie pour contrôler le trafic routier [43].

Pour la détection de véhicules en déplacement, deux approches ont été décrites par Shilh et *al.* [44]. La première consiste à programmer le nœud capteur de façon à mesurer le signal dès qu'il y'a perturbation du champ magnétique terrestre généré par le passage d'un véhicule (application orientée évènement). Pour des raisons de changement d'états ("sommeil/actif") des composants du nœud capteur liés au passage du véhicule, cette approche peut s'avérer inefficace pour un trafic très dense. Ce dernier trouvera son intérêt dans la deuxième approche qui consiste à programmer le nœud capteur à acquérir les signaux à une cadence continue, (application temporelle), et les transférer à la station de base. Les données collectées par ce dernier permettront de localiser le passage des véhicules par des pics (amplitudes significatives des échantillons des signaux détectés par le nœud capteur). On pourrait également envoyer une requête au nœud capteur après un certain temps pour connaître son niveau d'énergie.

3.7 Justifications de l'utilisation des RCSF pour le trafic routier

De nos jours, le trafic routier est un problème important lié à la congestion routière dans la majorité des routes et des autoroutes des grandes villes et métropoles mondiales. Elle constitue de plus en plus un facteur pesant sur la vie économique, sur le transport de marchandises et sur l'ensemble des usagers du réseau routier. Ses répercussions se manifestent dans l'augmentation du temps de déplacements, la surconsommation du carburant, la pollution, le stress et les risques d'accidents. De même, la congestion routière restreint le volume du marché et l'accessibilité à certaines activités économiques.

Au Canada par exemple, le coût total de la congestion routière en 2002 se situait entre 2,3 milliards de dollars et 3,7 milliards de dollars pour les principales zones urbaines [30]. Dans cette étude, la valeur du temps perdu par les véhicules en circulation dans la congestion représente plus de 90% du coût total. Le reste représente la valeur du carburant consommé (environ 7 %) et les gaz à effet de serre émis dans les conditions de congestion (environ 3 %).

Au regard de ces conséquences hautement négatives attribuées à la congestion routière, il est indispensable de développer un système d'acquisition de données (détection des véhicules) à grande échelle et en temps réel afin de contrôler plusieurs paramètres du trafic (le débit, la vitesse, la classification, le taux d'occupation et le temps de présence ponctuel de véhicules) par le traitement des données grâce à des systèmes informatiques au centre de gestion du trafic routier et l'information par radio ou Internet aux usagers sur des prévisions de trafic et des conseils sur les itinéraires à emprunter suivant les directions.

Les réseaux de capteurs sans fil dont les nœuds intègrent les magnétomètres pour la détection de véhicules automobiles présentent donc un intérêt considérable et une nouvelle étape dans l'évolution des technologies de l'information et de la communication. Cette nouvelle technologie suscite un intérêt croissant pour la gestion du trafic routier par rapport aux autres techniques de détection des véhicules. Les avantages qu'offrent les réseaux de capteurs sans fil sont :

3.7.1 La flexibilité

Les réseaux de capteurs sans fil ont un niveau élevé de flexibilité dans leur configuration de déploiement. Étant donné que les nœuds capteurs peuvent être placés n'importe où sur la route aussi longtemps qu'ils sont à portée de communication, des configurations personnalisées peuvent être adoptées pour les différentes applications. Cette caractéristique unique est un grand avantage sur les autres technologies de surveillance.

3.7.2 La multifonctionnalité

Un système multifonction de surveillance sans fil peut être développé par l'ajout d'autres modalités de détection pour les plateformes existantes du nœud capteur. Les capteurs de température peuvent être ajoutés pour détecter la possibilité de la glace et la neige; les capteurs d'humidité peuvent être ajoutés pour détecter la pluie et le brouillard; les accéléromètres peuvent être ajoutés pour le suivi des structures des ponts et chaussées. Cette caractéristique multifonctionnelle étend par ailleurs la possibilité de plus d'applications des systèmes de transports intelligents avancés.

3.7.3 La capacité de communication sans fil

La recherche sur le contrôle de la sécurité par la communication inter-véhicules (CIV) et de la communication route véhicule (CRV) [10] est activement menée. Les nœuds capteurs peuvent être utilisés pour étendre les réseaux de communication de la CIV et CRV en utilisant simplement le protocole IEEE 802.11p et *Dedicated Short Range Communications* (DSRC) [26]. Cette fonctionnalité est extrêmement utile dans l'amélioration du contrôle de la sécurité aux intersections, où les feux et panneaux d'avertissement peuvent être contrôlés à l'avance.

3.7.4 Comparaison des RCSF aux autres technologies de détection de véhicules

Le trafic se définit par des paramètres élémentaires dont la définition est en fait liée aux possibilités des capteurs correspondants. En effet, quel que soit le capteur utilisé, son principe repose sur l'analyse de la variation d'un paramètre physique au passage des véhicules, le plus souvent de façon ponctuelle. Grâce à l'analyse de cette variation, on peut détecter le passage ou la présence d'un véhicule. De nos jours, il existe plusieurs types de capteurs de trafic routiers. Ces derniers peuvent être classés en deux grandes catégories :

- les capteurs non-intrusifs qui sont généralement disposés le long des voies en hauteur sur un portique ou sur le côté de la route sur un support fixe ;
- les capteurs intrusifs qui sont insérés dans la chaussée ou fixés solidairement sur la chaussée.

Dans cette section, nous ferons une comparaison des réseaux de capteurs sans fil par rapport aux autres technologies de capteurs de trafic routier suivant le type de données que nous pouvons obtenir à partir de leurs mesures, la performance dans la précision de leurs mesures et enfin les facteurs environnementaux qui peuvent influencer sur leurs mesures.

a) Les types de données fournies par les mesures de capteurs

Dans l'étude de la gestion du trafic routier, le traitement des mesures des capteurs au centre de gestion du trafic doit pouvoir fournir un certain nombre de données (le débit, la vitesse, la classification, le taux d'occupation et le temps de présence ponctuel de véhicules) afin d'éviter

ou de prévenir la congestion de la circulation routière. Le tableau 3.2 présente les types de données qu'on peut obtenir à partir des mesures des différents capteurs de trafic routier [15,16].

Tableau 3.2 - Type de données fournies par les mesures de capteurs routier [15, 16]

Type de capteurs	Type de données					
	Débit	Vitesse	Classification	Taux d'occupation	Taux de présence	Source
Capteurs non intrusifs						
Vidéo	O	O	O	O	O	[15]
Radar à effet Doppler	O	O	O	O	N	[16]
Infrarouge passif	O	O	O	O	O	[15]
Infrarouge actif	O	O	O	N	N	[15]
Acoustique passif	O	O	O	O	O	[15]
Capteurs intrusifs						
Boucle magnétique	O	O	O	O	O	[15]
Pneumatique	O	O	O	N	N	[15]
Piézo-électrique	O	O	O	N	N	[15]
RCSF (magnétomètre)	O	O	O	O	O	
<i>O: peut fournir ce type de données, N: ne peut pas fournir ce type de données.</i>						

À partir des mesures de tous les types de capteurs, on peut obtenir les données de débit du trafic (nombre de véhicules passant en un point pendant un certain temps) et la classification de véhicules (répartition des véhicules suivant des grandeurs les caractérisant).

L'estimation de la vitesse de circulation d'un véhicule peut s'effectuer à partir des mesures de deux capteurs distants prises dans un intervalle de temps lors du passage du véhicule. Ce processus d'estimation de la vitesse peut s'effectuer pour tous les types de capteurs présentés dans le tableau 2.1 sauf pour le capteur radar. Celui-ci peut grâce à sa technologie Doppler, fournir la vitesse de circulation du véhicule avec une seule mesure mais ne peut pas fournir des données de temps de présence ponctuel (durée de passage d'un véhicule au travers d'un plan fictif orthogonal à sa trajectoire) parce que la technologie Doppler ne répond pas aux véhicules immobiles.

Les mesures du capteur vidéo, du capteur radar à effet Doppler, du capteur à boucle inductive ou des réseaux de capteurs sans fil avec magnétomètre intégré dans le nœud capteur peuvent fournir les données du taux d'occupation du trafic (le taux d'occupation rend compte d'un niveau de saturation de la chaussée).

b) La précision des mesures

La précision des mesures est très importante lors du choix d'un capteur. Les statistiques de performance des capteurs fournis par les fabricants sont généralement exagérées, car ils ont tendance à utiliser des conditions idéales pour l'évaluation de leurs produits alors que les facteurs environnementaux et le trafic trop élevé des véhicules ont une incidence pratique sur les mesures fournies par le capteur.

De nombreuses études de recherches universitaires ont évalué les différents capteurs routiers et l'impact des facteurs du monde réel sur la précision de leurs mesures. Certains de ces cas d'évaluation sont résumés dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3 - Performance des capteurs routier [15, 16]

Type de capteurs	Marque	Taux d'erreur (%)		Source
		Débit	Vitesse	
Capteurs non intrusifs				
Vidéo	<i>Autoscope solo</i>	5	2.5 - 7	[15]
Radar à effet Doppler	<i>TDN30</i>	2.5 - 13.8	1	[16]
Infrarouge passif	<i>ASIM IR 254</i>	10	10.8	[15]
Infrarouge actif	<i>Autosense II</i>	0.7	5.8	[15]
Acoustique passif	<i>SAS-I</i>	8 - 16	4.8 - 6.3	[15]
Capteurs intrusifs				
Boucle magnétique	<i>Saw-cut</i>	0.1 - 3	1.2 - 3.3	[15]
Pneumatique		0.92 - 30		[15]
RCSF (magnétomètre)	<i>VDM10</i>			

En présence du brouillard ou la neige, le capteur vidéo donne un taux d'erreur de 5%. Le capteur à boucle magnétique est l'un des capteurs le plus précis. Selon une étude au Minnesota [15], cette technologie de capteur a donné un taux d'erreur de 0.1 à 3% pour le comptage des

véhicules sur l'autoroute. Les réseaux de capteurs sans fil avec magnétomètre intégrés dans les nœuds capteurs, fonctionnent selon le même principe de mesure que celle de la technologie à boucle inductive (mesurer les perturbations du champ magnétique terrestre générés par le passage ou la présence des véhicules). Ce qui nous amène à penser que les réseaux de capteurs sans fil pourraient donner des résultats aussi intéressants que les boucles magnétiques. Le défaut de ces derniers est qu'ils consomment beaucoup d'énergie électrique et nécessitent un coût élevé d'installation et de maintenance. En outre, ils exigent de fermer entièrement la route, de mobiliser de nombreux techniciens et d'entreprendre d'importants travaux pour l'installation et la maintenance. Par ailleurs, l'équipe de déneigement peut causer des dommages aux boucles magnétiques. Les températures trop élevées peuvent provoquer le déplacement de l'asphalte et par conséquent causer les dommages des boucles magnétiques.

c) Les facteurs environnementaux

Les conditions de trafic et des facteurs environnementaux comme le vent, la pluie, la température, l'ombre ou la lumière peuvent affecter les performances de certains capteurs de trafic routier.

La pluie et la neige peuvent réduire la visibilité et produire un obstacle à la détection des ondes de courte durée. Le vent peut changer la position du capteur ou causer des vibrations en particulier lorsque le capteur est installé sur un portique. Le mouvement de ces vibrations peut ainsi réduire la précision des mesures. En outre, le bruit acoustique peut interférer sur les mesures du capteur.

Les mesures d'un capteur peuvent aussi dépendre du volume de trafic. La congestion de la circulation en l'occurrence peut influencer la mesure de certains capteurs.

Le tableau 3.4 présente quelques facteurs environnementaux qui influencent sur les mesures des différents capteurs.

Tableau 3.4 - Facteurs environnementaux influant sur les capteurs routier [15, 16]









Type de capteurs	Facteurs environnementaux				
	Vent	Température	Lumière	Trafic élevé	Source
Capteurs non intrusifs					
vidéo	A	A	A		[15]
Radar à effet Doppler				A	[16]
Infrarouge passif					[15]
Infrarouge actif		A			[15]
Acoustique passif		A		A	[15]
Capteurs intrusifs					
Boucle magnétique		A			[15]
Pneumatique		A		A	[15]
Piézo-électrique		A			[15]
RCSF (magnétomètre)					
<i>A: le capteur est affecté par ce facteur environnemental.</i>					

3.8 Contraintes matérielles d'un nœud capteur

Les nœuds capteurs sont généralement de très petite taille. À cause de la miniaturisation des composants électroniques, les performances des nœuds capteurs sont limitées. Par conséquent, ils collaborent en traitant partiellement les mesures captées. Ces limitations imposent parfois des portées de transmission réduites contraignant les informations à être relayées de nœud capteur en nœud capteur avant d'atteindre la station de base. En outre, les industriels veulent mettre en œuvre des capteurs simples, petits et peu coûteux qui peuvent être achetés en masse.

Le tableau 3.5 présente les capacités de certains capteurs commerciaux particuliers [4].

Tableau 3.5 - Caractéristiques de certains capteurs commerciaux [4]

Module Type Year	WoC 1998	Revé 1999	Revé 2 2000	Dot 2000	Mica 2001	Mica2Dot 2002	Mica 2 2002	Telos 2004
								
Microcontroller	AT90LS8535		ATmega163		ATmega128		T1MSP430	
Type	8		16		128		60	
Program memory (KB)	0.5		1		4		2	
RAM (KB)	15		15		8		33	
Active Power (mW)	45		45		75		75	
Sleep Power (μ W)	1000		36		180		180	
Wakeup Time (μ s)								
Nonvolatile storage								
Chip	24LC256				AT45DB041B		ST M24M015	
Connection type	I ² C				SPI		I ² C	
Size (KB)	32				512		128	
Communication								
Radio	TR1000		TR1000		CC1000		CC2420	
Data rate (kbps)	10		40		38.4		250	
Modulation type	OOK		ASK		FSK		O-QPSK	
Receive Power (mW)	9		12		29		38	
Transmit Power at 0dBm (mW)	36		36		42		35	
Power Consumption								
Minimum Operation (V)	2.7		2.7		2.7		1.8	
Total Active Power (mW)	24		27		44		41	
Programming and Sensor Interface								
Expansion	none	51-pin	51-pin	none	51-pin	19-pin	51-pin	10-pin
Communication	IEEE 1284 (programming) and RS232 (requires additional hardware)							USB
Integrated Sensors	no	no	no	yes	no	no	no	yes

Les microcontrôleurs choisis sont généralement d'une faible vitesse. De même, la mémoire disponible pour les programmes et les données est très réduite en comparaison avec celle des équipements informatiques d'aujourd'hui. En effet, des caractéristiques comme la haute vitesse de traitement et de transmission de données sont des facultés qui amènent à une consommation énergétique très importante. Si on veut avoir de capteurs de taille microscopique, de faible consommation d'énergie et de faible coût de fabrication, on ne peut pas utiliser de microcontrôleurs ou transmetteurs radio de haute vitesse.

La plupart des fabricants adoptent des émetteurs RF à basse fréquence. Certains ont choisi de mettre en œuvre un protocole (Zigbee) d'origine récente conçu pour les modules sans fil industriels et spécifié dans la norme IEEE 802.15.4. Cette dernière a été conçue pour interconnecter des unités embarquées contraintes énergétiquement comme des nœuds capteurs sans fil à une station de base. ZigBee est un protocole de haut niveau permettant la

communication de petites radios, à consommation réduite, basée sur la norme IEEE802.15.4 pour les réseaux à dimension personnelle (*Wireless Personal Area Networks : WPANs*). Il est caractérisé par une portée maximum de quelques centaines de mètres, un débit faible (250 Kb/s max) et a besoin d'une mémoire d'environ 4 à 32 Kb.

Les ondes infrarouges représentent un autre support possible pour la communication inter-nœuds dans un réseau de capteurs. Ce type de communication est également libre de toute charge ou licence, il est robuste contre les interférences avec les appareils électriques, et les modules de communication correspondants sont moins chers sur le marché, et plus faciles à construire. Ceci peut expliquer l'existence des ports de communication infrarouge dans la plupart des ordinateurs, téléphones portables et *PDA*s.

Smart Dust [47] est un projet dans le domaine des réseaux de capteurs qui utilise un support de communication optique entre les nœuds. L'inconvénient majeur pour un support de communication optique, est qu'il exige la disponibilité permanente d'une ligne de vue entre l'émetteur et le récepteur.

3.9 Problèmes de consommation d'énergie d'un nœud capteur

Bien que les réseaux de capteurs sans fil présentent de nombreux avantages, la durée de vie, le temps de réponse et la fréquence d'échantillonnage des nœuds sont parmi les paramètres les plus critiques, et ils sont étroitement liés à une contrainte cruciale qui est très difficile à satisfaire : la consommation d'énergie. Les nœuds sont conçus pour être alimentés par des piles, car elles peuvent être utilisés dans tout type d'environnement, y compris à l'intérieur du revêtement de la chaussée pour détecter le passage des véhicules afin d'assurer une bonne gestion du trafic routier. Par conséquent, l'utilisation des techniques de maîtrise de leur consommation d'énergie comme l'échantillonnage compressif doivent être des challenges à relever. À noter qu'une fois qu'un nœud a épuisé son énergie, il est considéré comme défaillant.

Détecter le passage des véhicules, élaborer un traitement partiel de données local puis transmettre les résultats à une station de base sont les principales tâches d'un nœud capteur utilisé pour la gestion du trafic routier. Les étapes de consommation d'énergie par le nœud

capteur peuvent être divisées en trois phases : le captage, le traitement et la communication de données.

3.9.1 L'énergie de capture

Il y a plusieurs sources de consommation d'énergie par le module d'acquisition de données, notamment l'échantillonnage et la conversion analogique-numérique des signaux. Étant donné la diversité des capteurs, il n'y a pas de valeurs typiques de l'énergie consommée. En revanche, les capteurs passifs (magnétique, humidité, température, sismiques, etc.) consomment le plus souvent peu d'énergie par rapport aux autres composants du nœud capteur. Cependant, l'énergie consommée au moment du captage varie suivant la nature de l'application. Par exemple, une détection permanente pourrait consommer moins d'énergie qu'une détection sporadique pour le cas des réseaux de capteurs sans fil utilisé pour la détection de véhicules dans un trafic dense.

3.9.2 L'énergie de traitement

L'énergie de traitement est l'énergie consommée par le module de traitement. Ce dernier possède divers modes de fonctionnement : actif, "idle" et sommeil, à des fins de gestion d'énergie. Chaque mode est caractérisé par une quantité différente de consommation d'énergie. Polastre et *al.* [36] ont présenté une évaluation de la consommation d'énergie de l'unité de traitement (MSP430) du nœud capteur *Telos* qui consomme un courant de 1,8 mA en mode actif, 54,5 μ A dans le mode "idle" et seulement 5,1 μ A dans le mode sommeil. Toutefois, la transition entre les modes de fonctionnement implique un surplus d'énergie et de latence. Ainsi, les niveaux de consommation d'énergie des différents modes, les coûts de transition entre les modes mais encore le temps passé par l'unité de traitement dans chaque mode peuvent avoir une incidence non négligeable sur la consommation totale d'énergie d'un nœud capteur. Dans certaines applications comme celle de l'étude d'un trafic routier, il serait préférable de laisser l'unité de traitement en mode actif.

3.9.3 L'énergie de communication

L'énergie de communication représente l'énergie la plus consommée dans un nœud capteur. Cela peut s'expliquer par la multitude de composants électroniques intégrés dans ce module de communication. La consommation d'énergie de ce dernier est affectée par la quantité des données à communiquer, la puissance de transmission (déterminée par la distance de transmission) et le type du système de modulation [37].

Le module de communication peut fonctionner dans quatre modes d'opération différents :

- émission : la radio transmet un paquet ;
- réception : la radio reçoit un paquet ;
- "idle": la radio est sous tension, mais elle n'est pas employée ;
- sommeil : la radio est mise hors tension.

Une observation pertinente dans le cas de la plupart des modules de communication est que le mode "idle" induit une consommation d'énergie significative, presque égale à la consommation en mode réception [50]. Ainsi, il est plus judicieux d'éteindre complètement le module de communication plutôt que de passer en mode "idle" quand on a ni à émettre ou ni à recevoir de données. Un autre facteur déterminant est que, le passage du module de communication d'un mode à un autre engendre une dissipation d'énergie importante due à l'activité des circuits électroniques. Raghunathan *et al.* [38] montrent d'ailleurs que le module de communication consomme une quantité d'énergie importante pour le démarrage de l'émetteur lorsqu'il passe du mode sommeil au mode émission pour envoyer un paquet.

Pour un trafic routier très dense, il serait important de programmer le nœud capteur de façon à ce que le module de communication fonctionne uniquement en mode émission et en mode "idle" car s'il fonctionne en mode émission et en mode sommeil, il pourra consommer plus d'énergie lié au fait du passage de mode sommeil en mode émission.

3.9.4 Les sources de surconsommation d'énergie

Une surconsommation d'énergie est toute consommation inutile que l'on peut éviter afin de conserver l'énergie d'un nœud capteur. Les sources de cette surconsommation sont

nombreuses, elles peuvent être engendrées lors des prises de mesures par le nœud capteur lorsqu'il est mal programmé (par exemple par une fréquence d'échantillonnage trop élevée par rapport à celle désirée) [2].

La surconsommation d'énergie peut également se produire lors de la communication de données. En effet, cette dernière est sujette à plusieurs phénomènes qui surconsomment de l'énergie surtout au niveau MAC où se déroule le contrôle d'accès au support sans fil. Les causes majeures de cette perte d'énergie sont [50, 2] :

- Les collisions

Dans les réseaux de capteurs sans fil, le fait que les nœuds se partagent un même canal de transmission engendre souvent une consommation considérable de l'énergie car il peut arriver que deux nœuds transmettent leurs paquets au même instant et provoque ainsi une collision de ces paquets. La retransmission des données du à la collision entraîne la consommation d'énergie additionnel.

- L'écoute à vide

Cette situation se présente lorsqu'un nœud capteur ne sait pas quand sera la réception d'un paquet et doit maintenir en permanence sa radio dans le mode prêt à recevoir. Ce mode consomme beaucoup d'énergie, à peu près égale à celle consommée en mode réception. Cette énergie est gaspillée s'il n'y a pas de transmission sur le canal.

Pour réduire la consommation d'énergie dans cette situation, on peut mettre le module de communication en mode veille quand il n'y a rien à transmettre. Ceci concerne les applications orientés évènement, orientés requêtes et hybrides. Cette technique d'optimisation d'énergie ne s'applique pas pour des applications temporelles telles que la détection de véhicules où le nœud doit acquérir et transmettre de façon continue les données.

- L'écoute abusive

Pour un réseau de capteurs sans fil très dense, la consommation d'énergie peut aussi être importante lorsqu'un nœud reçoit les données qui ne lui sont pas destinés.

- La surémission

La surémission (*overmitting*) se produit quand un nœud capteur envoie des données à un destinataire qui n'est pas prêt à les recevoir. Dans ce cas, les messages envoyés sont considérés comme inutiles et consomment de l'énergie supplémentaire.

- La taille des paquets de contrôle

La taille des messages a un effet sur la consommation d'énergie lors de l'émission et de réception par les nœuds capteurs. Ainsi, la taille des paquets ne doit pas être trop élevée ni trop faible. En effet, si elle est petite, le nombre de paquets de contrôle augmente la consommation d'énergie. Dans l'autre cas, une puissance de transmission élevée est nécessaire pour une grande taille de paquets.

3.9.5 Énergie consommée par un nœud capteur

Il est difficile d'apporter une étude quantitative et comparative précise de la consommation d'énergie de chaque composant d'un nœud capteur en raison du grand nombre de plateformes commerciales existantes. Cependant, les expérimentations ont montré que c'est la communication (émission ou réception) des données qui est la plus consommatrice d'énergie [38]. Pottie *et al.* [37] illustrent effectivement cette disparité : le coût énergétique nécessaire pour transmettre 1 Kilo-octet sur une portée de 100 mètres est approximativement égal à celui nécessaire pour exécuter 3 millions d'instructions à une vitesse de 100 millions d'instructions par seconde.

Dubois-Ferrière *et al.* [19] présente au tableau 3.6 la consommation du courant, le temps de latence du microcontrôleur (*MCU*) et de la radio de quelques plates-formes commerciales des nœuds capteurs (*Mica2*, *TelosSky*, *EyesIFX* et *TinyNode*). Bien que les nœuds capteurs *TelosSky*, *EyesIFX* et *TinyNode* ont un même microcontrôleur, ils présentent les caractéristiques radios différentes.

Tableau 3.6 - Consommation du courant et temps de latence des nœuds capteurs [19]

	Mica2	Telos_Sky	Eyes	TinyNode	
Min Voltage	2.7	1.8	2.1	2.4	V
Max Voltage	3.3	3.6	3.6	3.6	V
MCU sleep with RTC on (LPM3)	19	5.1	5.1	5.1	μ A
MCU active	8	1.8	1.8	1.8	mA
MCU active, Radio RX	15.1	21.8	10.8	15.8	mA
MCU active, Radio TX at +0dBm (1mW)	25.4	19.5	13.7	25	mA
MCU active, Flash Read	9.4	4.1	5	5	mA
MCU active, Flash Write	21.6	15.1	16	16	mA
MCU wake-up latency	180	6	6	6	μ s
Radio wake-up latency	1800	580	2200	1500	μ s

En faisant tout simplement le calcul de consommation d'énergie pour le traitement d'un paquet de données par le microcontrôleur et le calcul de consommation d'énergie pour la transmission d'un paquet par la radio suivant la formule :

$$\text{Énergie consommée} = \text{tension} \times \text{courant} \times \text{temps de latence} \quad (3-1)$$

On constate que l'énergie consommé par le module de communication est très grande comparée à celle consommée par le microcontrôleur quel que soit la plateforme des nœuds capteurs.

3.10 Apport de minimisation de consommation d'énergie par le CS

Tel qu'observé à la section précédente, la consommation d'énergie dans les réseaux sans fil et en particulier dans les réseaux de capteurs sans fil concerne essentiellement les communications : émission et réception. Heinzeilman et *al.* [23] proposent un modèle de consommation d'énergie pour les nœuds capteurs comme le montre la figure 3.5. Ils se basent sur le fait que la consommation d'énergie serait probablement dominée par les composants du module de communication.

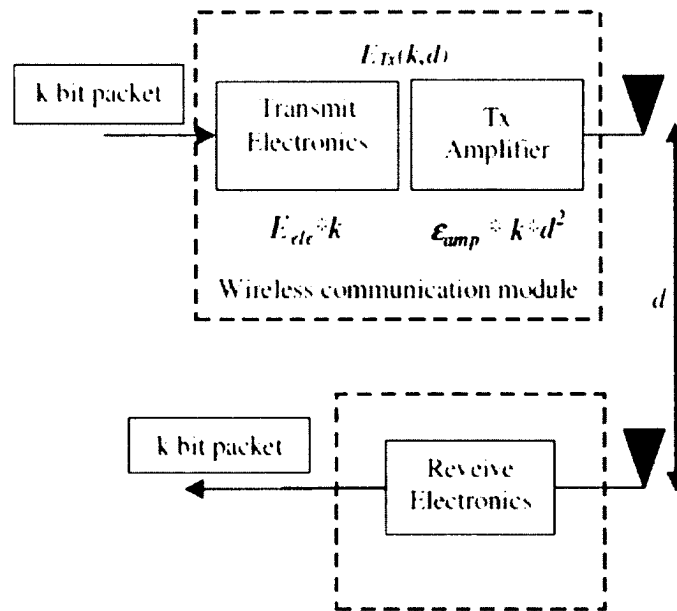


Figure 3.5 - Modèle radio de consommation d'énergie [23]

Pour émettre un message de k bits vers un récepteur loin de d mètres, l'émetteur consomme :

$$E_{Tx} = k \times (d^2 \times \epsilon_{amp} + E_{elec}) \quad (3-2)$$

Pour recevoir un message de k bits, le récepteur consomme :

$$E_{Rx} = k \times E_{elec} \quad (3-3)$$

E_{elec} et ϵ_{amp} représentent respectivement l'énergie de transmission électronique et d'amplification.

Nous remarquons dans ce modèle que l'énergie d'émission ou de réception de données est proportionnelle au nombre de bits envoyés ou reçus par le nœud capteur.

Si les signaux récoltés par les nœuds capteurs possèdent certaines propriétés, on pourrait utiliser la technique de l'échantillonnage compressif pour acquérir moins de données et par conséquent moins de bits à transmettre à la station de base, ce qui augmentera la durée de vie des nœuds capteurs.

Si la technique de l'échantillonnage compressif est effectuée avec environ $s \times \log(n)$ échantillons au lieu de n échantillons (s étant le nombre de coefficients significatifs dans la

base où le signal présente un caractère parcimonieux) alors, d'après le modèle de consommation d'énergie de *Heinzelman et al.* [23], on aura un gain en énergie d'environ :

$$1 - \frac{s \cdot \log(n)}{n} \quad (3-4)$$

D'où une forte maximisation de la durée de vie du capteur avec également un gain en stockage de données au centre de traitement de gestion de trafic. C'est par rapport à cette analyse, qu'on a jugé utile de tester par des simulations, l'utilisation de la technique de l'échantillonnage compressif par les réseaux de capteurs sans fil pour la détection de véhicules.

Pour effectuer ces simulations, il nous faut des signaux réels récoltés par un réseau de capteurs sans fil sur la chaussée. Dans le chapitre suivant, nous présentons le matériel et les méthodes d'expérimentation qu'on a utilisée pour obtenir les signaux réels de détection de véhicules.

CHAPITRE 4 Détection de véhicules par un RCSF

4.1 Objectif

L'objectif du projet est d'étudier l'applicabilité de l'échantillonnage compressif pour la détection de véhicules sur la chaussée par un réseau de capteurs sans fil. Pour atteindre et valider cet objectif, on a suivi les étapes telles que les présente le schéma ci-dessous :

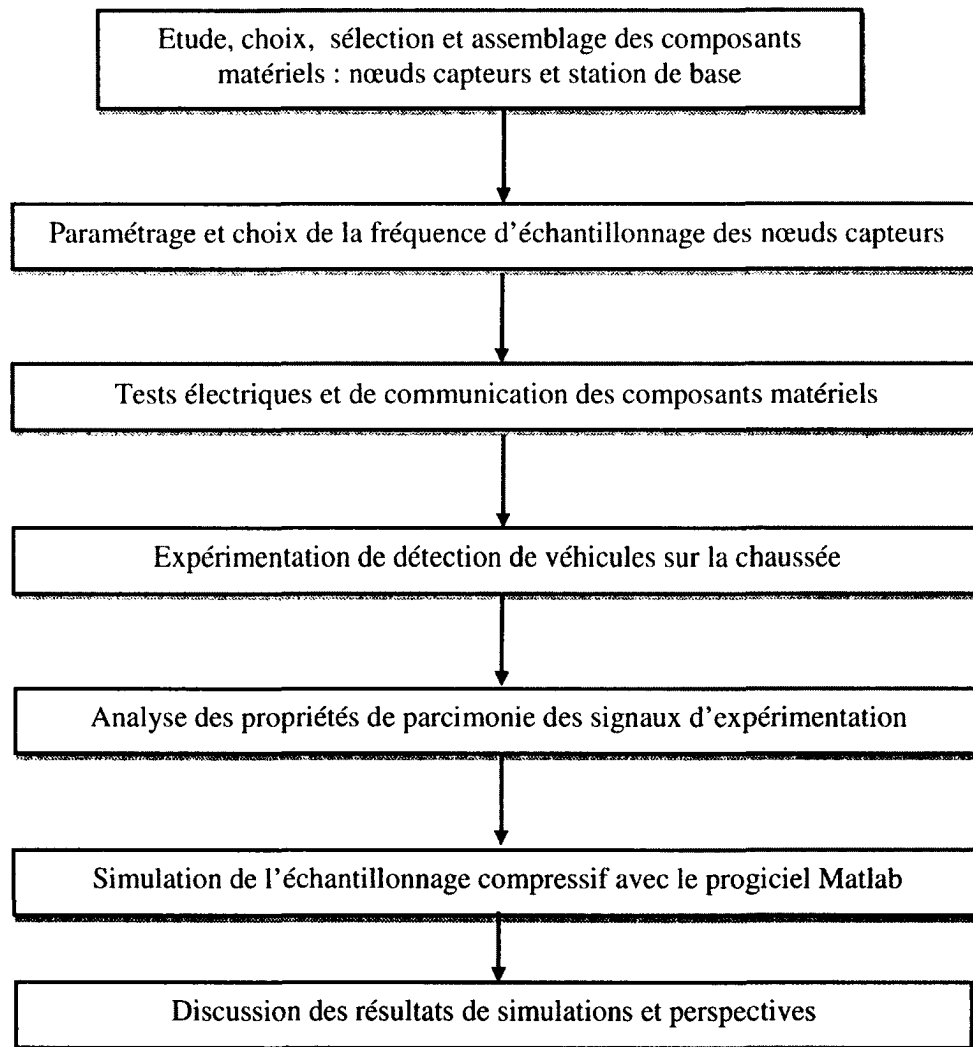


Figure 4.1 : Les étapes de la réalisation du projet

Dans ce chapitre, nous présentons :

- Les critères de choix de sélection et la description des composants matériels ;
- Le paramétrage et le test de communication des composants matériels en laboratoire;
- Les méthodes utilisées pour réaliser l'expérimentation de détection de véhicules sur la chaussée et le calcul des paramètres du trafic suite aux signaux obtenus.

Au chapitre suivant, on étudiera les propriétés de parcimonie des signaux. Par la suite, on effectuera à partir de ces signaux, des simulations d'acquisition suivant le protocole de l'échantillonnage compressif.

4.2 Les composants matériels

Pour développer un outil permettant d'obtenir les signaux du champ magnétique pour la détection des véhicules en déplacement sur la chaussée, on a effectué une analyse comparative des spécifications matérielles et logicielles (capteur magnétique intégré, système d'exploitation, fréquence d'échantillonnage de signaux, bande passante de communication, température de fonctionnement, etc.) sur plusieurs plateformes : Crossbow [14], Dust Inc. [21], Microstrain [28] et coalesenses [11]. De cette analyse comparative, on a utilisé une combinaison de plusieurs modules électroniques de la compagnie allemande *Coalesense* pour réaliser notre expérimentation.

Les critères de sélection qui ont permis de justifier le choix de la plateforme *coalesenses* sont les suivants :

- Les composants peuvent fonctionner dans une large plage de température (-20 ° C à + 70°C). En outre, ils disposent en option des boîtiers imperméables à l'eau et non ferromagnétiques; ce qui permet d'intégrer les composants assemblés dans ce type de boîtier en toute quiétude;
- Les connexions des différents modules sont assez flexibles et compatibles;
- Le module de traitement possède un jeu d'instructions réduit et dispose une mémoire intégrée, ce qui limite les communications avec une mémoire extérieure et donc économise de l'énergie;

- Les modules radio obéissent à la réglementation et aux normes d'utilisation des bandes passantes ISM (Les bandes ISM (industriel, scientifique, et médical) sont des bandes de fréquences qui ne sont pas soumises à des réglementations nationales et qui peuvent être utilisées librement et sans autorisation pour des applications industrielles, scientifiques et médicales.); c'est la raison pour laquelle, nous avons pu effectuer nos tests et expérimentation sans réglementation particulière.

La figure 4.2 présente la plateforme matérielle des différents éléments qui peuvent constituer un réseau sans fil de la compagnie *Coalesenses* :

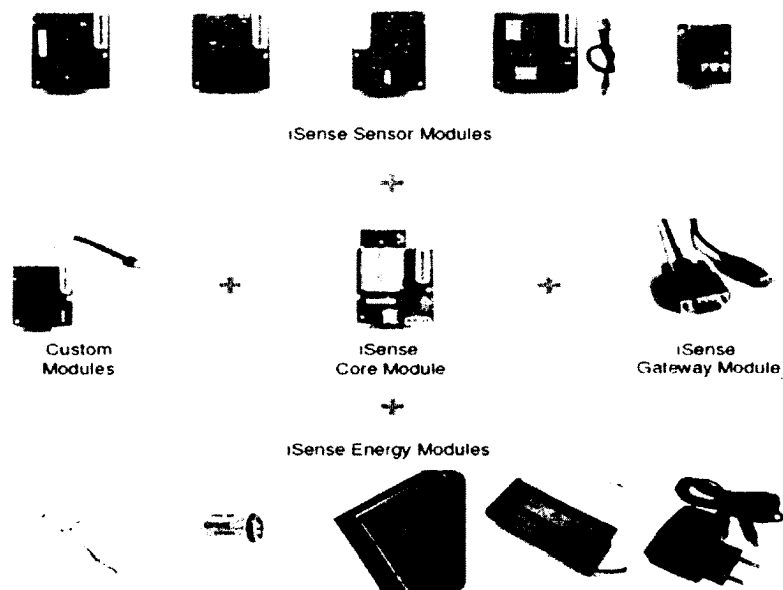


Figure 4.2 - Plateforme matérielle d'un RCSF de la compagnie *Coalesenses* [11]

Lors de notre expérimentation, on a emprunté aux services des ressources de l'Université de Sherbrooke, une caméra vidéo de marque *panasonic recorder model N° AG DVC20P*. Ce dernier, fixée sur un trépied près du trottoir a permis d'enregistrer une vidéo de passage des véhicules sur la chaussée pendant l'expérimentation. Grâce aux données de cette vidéo, on a comparé les résultats de détection obtenus par les nœuds capteurs. La caméra vidéo utilisée, présente les caractéristiques décrites dans [33].

4.2.1 Le nœud capteur

Le concept prévalent dans le développement de nœuds capteurs de la compagnie *Coalesenses* est la conception modulaire. Ceci permet bien sûr de pouvoir réutiliser les mêmes cartes pour différentes applications. C'est avantageux pour notre laboratoire, car la plateforme pourra être utilisée dans le futur pour réaliser les tests sur d'autres types de signaux. Par exemple les signaux relatifs à la température de la chaussée, à son humidité ou à la présence de la glace.

Le nœud capteur assemblé pour notre application est constitué :

- Une carte de capteurs distincte (*iSense Vehicle Detection Sensor Module*) qui regroupe un capteur de champ magnétique pour mesurer distinctement les variations locales des composants X et Y du champ magnétique perturbés par le véhicule en déplacement ou immobile sur la chaussée. Les signaux de chaque composant du champ magnétique sont ensuite amplifiés et filtrés par un filtre passe bas de 1 KHz ;
- Une carte principale (*iSense Core Module 2*) qui regroupe le module de traitement et le module de communication ;
- Un emplacement pour loger deux batteries (*iSense 2XAA Battery*). Ces derniers alimentent en énergie les différents modules cités plus haut ;
- Une boîte non ferromagnétique et imperméable pour loger tous les modules une fois assemblé afin de pouvoir l'installer dans la chaussée.

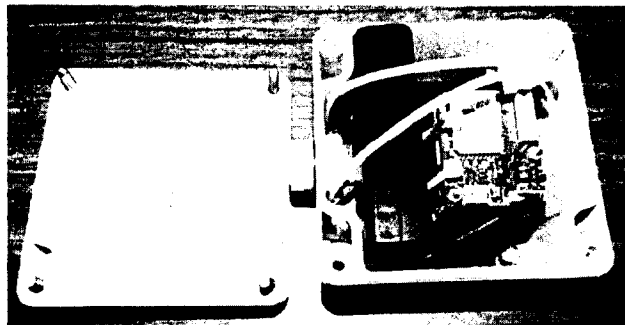


Figure 4.3 - Nœud capteur assemblé pour la réalisation de l'expérimentation

a) Le capteur de champ magnétique

Tout objet ferromagnétique crée dans son voisinage une déformation des lignes de force du champ magnétique terrestre, qui en l'absence de perturbation est uniforme. La figure 4.4 présente comment un objet ferreux tel un véhicule crée des perturbations des lignes du champ magnétique terrestre.

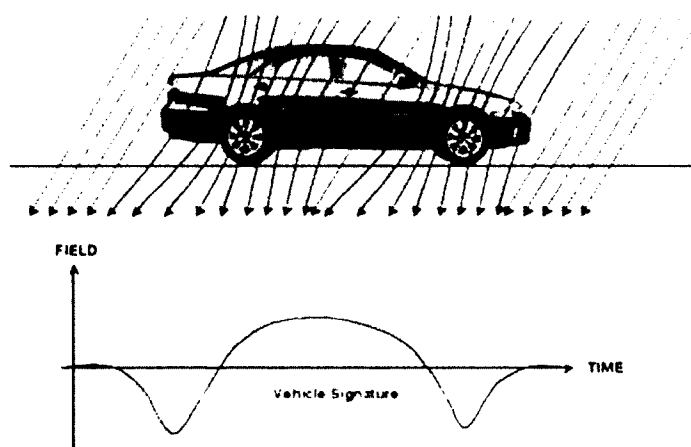


Figure 4.4 - Perturbation du champ magnétique terrestre par un véhicule [9]

La mesure dynamique de variations locales du champ magnétique terrestre par un capteur de champ magnétique permet de détecter la présence d'un véhicule.

De nos jours, il existe un grand nombre de capteurs de champ magnétique basés sur des phénomènes physiques variés. Le capteur de champ magnétique intégré dans la carte de capteurs *iSense Vehicle Detection Sensor Module*, est le capteur *Phillips KMZ52*. Ce dernier fonctionne suivant le phénomène de magnétorésistance anisotrope (*Anisotropic Magneto-Resistance : AMR* en anglais).

Le phénomène de magnétorésistance anisotrope est connu depuis 1857 et fut découvert par *William Thompson* dans les matériaux ferromagnétiques. Cet effet est basé sur la variation de la résistance (ou résistivité) d'un matériau magnétique lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. La figure 4.5 représente le schéma de principe de fonctionnement d'un capteur *AMR*.

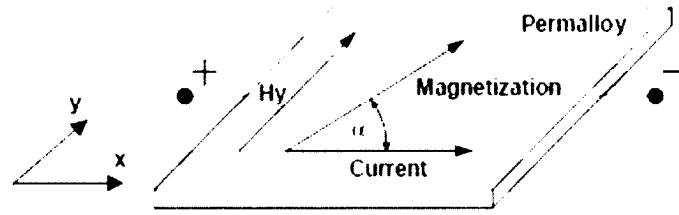


Figure 4.5 - Schéma de principe de fonctionnement d'un capteur AMR [34]

L'application d'un champ magnétique entraîne une rotation de l'aimantation du matériau magnétique. Ce dernier s'écarte de sa position d'équilibre et génère ainsi une variation de la résistivité du capteur. L'expression générale donnant la résistivité ρ en fonction de l'angle θ est :

$$\rho = \rho_{\perp} + (\rho - \rho_{\perp}) \cdot \cos^2 \theta \quad (4-1)$$

où ρ_{\perp} et ρ représentent les résistances lorsque l'aimantation de la couche est respectivement perpendiculaire et parallèle à la direction du courant et θ est l'angle entre l'aimantation du matériau magnétique et la direction du courant.

Le matériau utilisé pour la fabrication d'un capteur AMR est le permalloy sur une plaquette de silicium. Les alliages utilisés sont binaires ($Ni_{81}Fe_{19}$) et ont des compositions telles qu'ils présentent une magnétorésistance comprise entre 2 et 3%.

Le capteur *Phillips KMZ52* est construit en deux ponts de Wheatstone, composé chacun de quatre bandes magnéto résistives pour mesurer les composantes X et Y du champ magnétique.

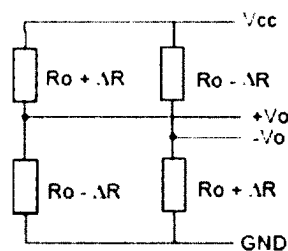


Figure 4.6 - Représentation d'un pont de Wheatstone du capteur *Phillips KMZ52* [35]

La variation de résistance ΔR dus à un champ magnétique est convertie en une variation linéaire de la différence de tension de sortie $\Delta V = [+V_0] - [-V_0]$. Par ailleurs, les coefficients de température inhérente des quatre résistances du pont sont mutuellement compensés. Ainsi, en l'absence de tout objet ferromagnétique tel un véhicule en déplacement ou immobile, la tension de sortie est sensiblement nulle.

Le capteur *Phillips KMZ52* a un temps de réponse rapide. Le tableau ci-dessous donne un sommaire des caractéristiques de ce capteur.

Tableau 4.1 - Sommaire des caractéristiques du capteur *Phillips KMZ52* [35]

Caractéristiques	Min	Typique	Max	Unité
Température de fonctionnement	- 40	-	125	°C
Domaine de variation de l'intensité de champ magnétique	-0,2	-	0,2	kA/m
Sensibilité	12	16	-	$\frac{mV}{V}$ kA / m
Temps de réponse	1	3	100	μs
Bande passante	0	-	1	MHz

Le capteur de champ magnétique *Phillips KMZ52* présent dans la carte *iSense Vehicle Detection Sensor Module* du nœud capteur aura donc pour fonction de mesurer la variation du champ magnétique terrestre généré lors de passage ou de présence d'un véhicule sur la chaussée.

b) La carte principale : *iSense Core Module 2*

La carte *iSense Core Module 2* est basée sur le module *Jennic JN5148*. Ce dernier est un microcontrôleur radiofréquence faible consommation d'énergie.

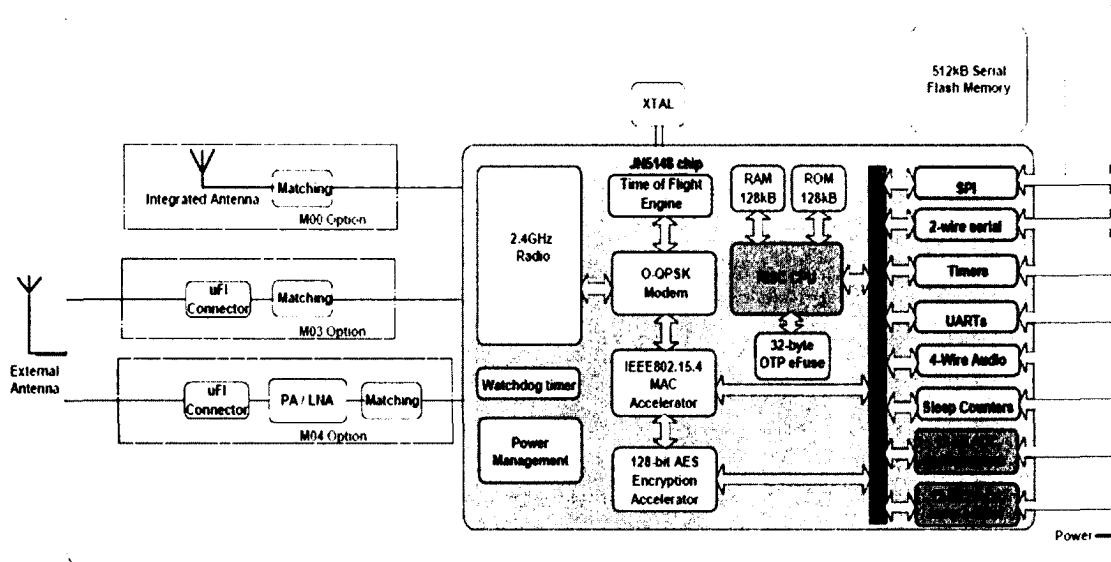


Figure 4.7 - Schéma fonctionnel d'un module *Jennic JN5148* [32]

La carte *iSense Core Module 2* intègre un microcontrôleur de type *RISC* c'est à dire que les instructions sont codés sur un seul mot. La particularité la plus connue des *RISCs* est leur jeu d'instructions réduit, caractérisé par une faible consommation d'énergie. Cette carte dispose également d'une grande capacité de mémoire et un émetteur-récepteur zigbee (conforme au standard 802.15.4) disposant de 16 canaux. Cet émetteur-récepteur avec antenne imprimée, utilise un débit allant jusqu'à 250 kb/s, opère à une fréquence de communication de 2,4 GHz (bande ISM) et permet des transmissions sans fil à des distances jusqu'à 600 mètres.

L'architecture mémoire de la carte *iSense Core Module 2* lui permet de stocker le système logiciel dédié au protocole de communication radio ainsi que le code et les données liés à l'application. À ce titre, une mémoire flash externe est utilisée pour mémoriser le code du programme, lequel est chargé dans la RAM interne du processeur pour être automatiquement exécuté au démarrage.

La carte *iSense Core Module 2* dispose aussi une adresse MAC, un accélérateur d'encryptage AES, une gestion d'interruptions (avec 15 niveaux de priorités), une interface *I2C* pour relier la carte de capteur *iSense Vehicle Detection Sensor Module*, ainsi que deux convertisseurs analogiques numériques 11 bits pour numériser chacun des signaux analogiques (composant X et Y) du champ magnétique issus des deux ponts de *Wheastone* du capteur de champ

magnétique (*Phillips KMZ52*), amplifiés et filtrés par un filtre passe bas de 1 kHz. D'après les spécifications du composant, il peut fonctionner à une température variant de -20°C à +70 °C.

4.2.2 La station de base

La station de base contient deux composants dont l'un est utilisé pour récupérer les signaux transmis par les nœuds capteurs à l'aide du réseau sans fil et l'autre pour envoyer les données à l'ordinateur. Le premier composant est la carte principale *iSense Core Module 2* qui permet la récupération de données transmises par les capteurs via des ondes radio. Le deuxième composant est une carte *iSense Gateway* qui est dotée d'une liaison filaire à l'ordinateur via un câble *USB*. Cette carte reçoit des données de la carte *iSense Core Module 2* et les transmet à l'ordinateur via le câble *USB*. La carte *iSense Gateway Module* couplée à la carte *iSense Core Module 2* forme donc une station de base pour la récupération de données des nœuds capteurs dans le réseau.

La carte *iSense Core Module 2* ne nécessite pas de piles car elle est alimentée par le dispositif de passerelle (carte *iSense Gateway Module*). Ce dernier utilise le port *USB* comme port *COM* virtuel pour établir la communication entre la station de base et l'ordinateur. Pour cela, il est nécessaire d'installer dans l'ordinateur les pilotes.

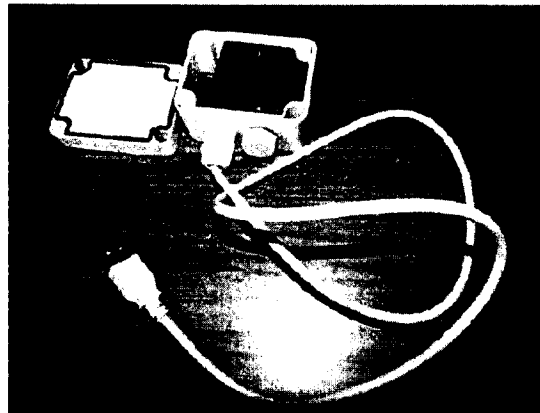


Figure 4.8 - La station de base assemblée pour la réalisation de l'expérimentation

4.3 La plateforme logicielle

L'environnement de développement utilisé pour la programmation des nœuds capteurs est fourni par *Coalesenses* sous la dénomination de *Isense software* [12]. Ce dernier offre un choix, en laissant au développeur de sélectionner la meilleure topologie du réseau, la puissance d'émission et la bande passante de transmission des signaux.

Les nœuds capteurs sont dotés d'un système d'exploitation open-source qui dispose d'une architecture basée sur des composants, ce qui réduit la taille du code et facilite la réutilisation de ce code dans de nombreuses applications. La bibliothèque de composants est assez complète puisqu'on y retrouve des protocoles réseaux, des pilotes de capteurs et des outils d'acquisition de données. Il n'existe pas d'exécutable pour le noyau du système. Il est construit au moment de la compilation de l'application en fonction des composants qu'elle utilise.

Le système d'exploitation de *Isense software* est basée sur la programmation orientée objet en C++ et fournit la mémoire dynamique et des abstractions du matériel. Ces derniers peuvent être réutilisés et sont assemblés dans des configurations afin de bâtir une application. La figure 4.9 présente l'architecture du système d'exploitation de *isense software*.

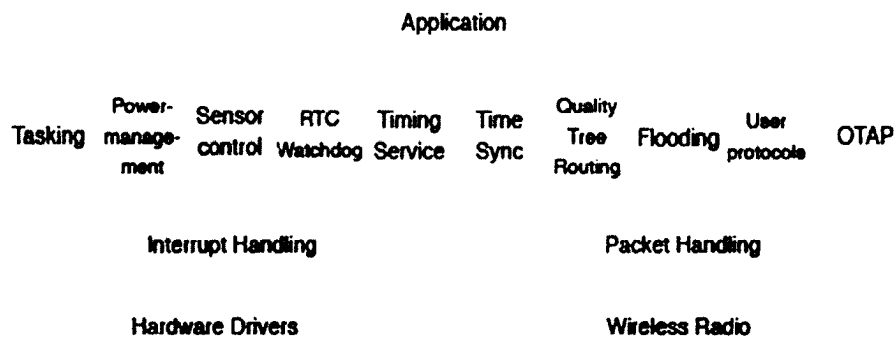


Figure 4.9 - Architecture du système d'exploitation de *isense software* [12]

Isense software possède comme environnement de développement pour le C++, le logiciel *Eclipse IDE*. On y trouve également le logiciel *iShell*. Ce dernier permet de :

- charger les programmes précompilés dans les nœuds capteurs et la station de base;

- modifier via le réseau sans fil, certains paramètres au fonctionnement du nœud capteur : fréquence d'échantillonnage d'acquisition et puissance de transmission des signaux;
- exporter les données acquises par les nœuds capteurs à travers la station de base;
- démarrer la mise en marche ou l'arrêt de détection des nœuds capteurs.

Après avoir étudié la documentation hardware et software du kit de réseaux de capteurs commercialisés par la compagnie *Coalesenses*, nous avons procédé à l'installation des différents logiciels et pilotes qu'offre l'environnement de développement *Isense software* sur un ordinateur portable de marque *Gateway* ayant un processeur de 1,6 GHz, une mémoire *RAM* de 1 Go, un disque dur de 140 Go et fonctionnant sous un système d'exploitation *Windows service pack 2*. Cet ordinateur portable a servi d'interface pour la modification des constantes de communication, de deux fichiers du code existant (acquisition de données et transmission de données) et l'importation des données mesurées de ces nœuds capteurs via la station de base. Les étapes nécessaires à l'installation des différents logiciels sont décrites dans les documents fournis par la compagnie, car les outils utilisés proviennent de différentes versions; ce qui complique l'installation et engendre des pertes de temps considérables.

4.4 Adaptation de l'application des nœuds capteurs

Le code de configuration des nœuds capteurs qu'a fourni la compagnie *Coalesenses* était basé sur une application orienté événement suivant une topologie maillée. On a reconfiguré ce code afin qu'ils puissent fonctionner sur une application temporelle suivant une topologie étoile (le code ainsi modifié se trouve en annexe).

Contrairement à la topologie maillée où les nœuds capteurs peuvent communiquer entre eux, il n'y a pas d'échange de communication entre les nœuds capteurs pour une topologie étoile. L'utilisation de cette dernière se justifie par la limitation de la réception des données d'un nœud capteur par un autre nœud capteur; ceci dans le but d'augmenter la durée de vie des batteries des nœuds capteurs.

Après avoir modifié les fichiers du code source, on l'a ensuite compilé par le logiciel *Eclipse IDE* et l'installé dans les nœuds capteurs via le logiciel *iShell*. Le code source qu'on a

modifié, permet également aux nœuds capteurs d'acquérir les signaux de champ magnétique à une cadence régulière (application temporelle). L'envoi d'une commande aux nœuds capteurs via le logiciel *iShell* permet aux nœuds capteurs de débiter l'acquisition des signaux jusqu'à ce que l'utilisateur envoie une nouvelle commande pour arrêter l'acquisition. Les données enregistrées par les nœuds capteurs sont envoyées à la station base et stockées dans un fichier qu'on peut consulter en temps réel. On peut aussi à partir du logiciel *iShell*, envoyer une commande aux nœuds capteur pour modifier leurs fréquences d'échantillonnage d'acquisition des signaux.

On aurait pu faire fonctionner les nœuds capteurs suivant un modèle événementiel, c'est à dire qu'il ne devient actif qu'à l'apparition du passage d'un véhicule. Le reste du temps, il restera en état de veille afin de garantir une durée de vie maximale aux faibles ressources énergétiques du nœud capteur. Cependant, cette alternative peut s'avérer inefficace pour un trafic routier très dense, si l'on prend en considération le temps et la consommation d'énergie liés au changement d'état "mode veille/mode actif" des composants d'un nœud capteur. C'est la raison pour laquelle on a paramétré les nœuds capteurs en mode actif. On verra à partir des simulations de l'échantillonnage compressif au chapitre suivant, qu'on peut prendre considérablement moins d'échantillons du signal de façon aléatoire en mode actif et obtenir des mêmes résultats qu'un mode actif à une cadence régulière. On a fixé la fréquence d'échantillonnage pour la détection de véhicules en se référant au cas extrême tel qu'expliqué au paragraphe suivant.

En supposant une voiture passagère de 2,6 mètres de long (longueur maximale conformément aux règlements fédéraux), roulant à 100 km/h (la limite de vitesse dans la zone où l'on a effectué l'expérience est de 50 km/h), la durée de passage au voisinage du nœud capteur serait environ $t = 0,1$ seconde. Par rapport à cette métrique de temps, on a paramétré les nœuds capteurs à obtenir les signaux à une fréquence de 20 Hz (0,05 seconde) de façon à ne pas manquer le passage d'un véhicule. À cette fréquence d'échantillonnage, le nœud capteur pourrait détecter au moins deux fois (deux échantillons) un véhicule passager roulant à 100 km/h. Si l'on augmente la fréquence d'échantillonnage, le nœud capteur devrait détecter plusieurs fois le même véhicule, par contre si l'on diminue la fréquence d'échantillonnage, le nœud capteur risque ne pas pouvoir détecter le véhicule. Pour être donc certain que le nœud

capteur puisse détecter un véhicule sur le tronçon de la chaussée où l'expérience a été réalisée, on a paramétré les nœuds capteurs à acquérir les signaux à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz.

Avant de procéder à l'expérimentation de détection de véhicules sur la chaussée, on a effectué une vérification de communication générale des composants matériels (nœuds capteurs et station de base) au laboratoire et testé l'acquisition à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz, en envoyant une commande aux nœuds capteurs via l'outil *iShell*. Ceci a permis d'observer que les nœuds capteurs envoyaient bien et bel 20 données par seconde à la station de base.

4.5 Mise en œuvre expérimentale

La figure 4.10 présente les deux façons possibles de placer les nœuds capteurs sur la chaussée afin de détecter le passage de véhicules.

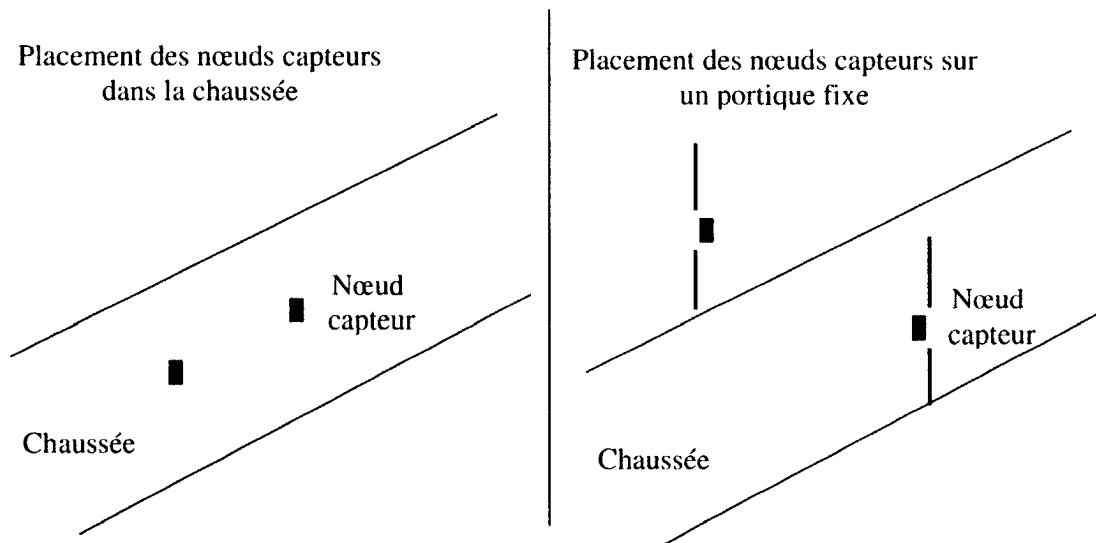


Figure 4.10 - Deux façons de placer les nœuds capteurs

Les nœuds capteurs peuvent être placés dans la chaussée. Dans ce cas, il faut creuser des petits trous avec des machines appropriées dans la chaussée pour placer les nœuds capteurs. Ils peuvent aussi être fixés en hauteur sur un dispositif non ferromagnétique sur le côté de la chaussée. C'est le dernier choix qu'on a réalisé.

Cependant, ne disposant pas des machines appropriées pour creuser des trous dans la chaussée et ne pouvant pas en avoir des autorisations auprès des municipalités, on a tout simplement placé les deux nœuds capteurs au bord de la chaussée. La figure 4.11 présente d'ailleurs une vue d'ensemble du placement des différents matériels pour la réalisation de l'expérience.



Figure 4.11 - Schéma expérimental de détection de véhicules sur la chaussée

La caméra vidéo, placée sur un trépied, est située près du trottoir pour enregistrer les données vidéo du passage des véhicules. La station de base reliée à l'ordinateur portable récupère les signaux enregistrés par les nœuds capteurs. Les signaux enregistrés par ces derniers seront comparés aux données de la caméra pour le calcul des paramètres du trafic. Ils seront aussi analysés pour des simulations de l'échantillonnage compressif.

Le placement des nœuds capteurs ont lieu sur un accès approprié à partir du bord de la chaussée afin d'assurer un bon parallélisme. Ils sont distants l'un de l'autre de 5 mètres. Cette

métrique est utile pour estimer la vitesse de circulation du véhicule. Avant de commencer l'expérience, l'horloge de la caméra vidéo et l'horloge de l'ordinateur ont été configurés à la même seconde afin d'être le plus synchrone possible. On s'est également assuré qu'il n'y ait pas d'objet ferromagnétique tel qu'un véhicule garé sur le trottoir se trouvant à proximité du nœud capteur car celui-ci pourrait influencer les mesures prises par le nœud capteur.

L'expérimentation a été réalisée le mercredi 9 février 2011 entre 12 h 16 min et 12 h 49 min, au Boulevard de l'Université de Sherbrooke. La météo indiquait une température de -9°C lorsqu'on effectuait l'expérience. Cet emplacement a été choisi comme site d'expérience parce que le trafic est assez dense dans cet horaire de la semaine. La vitesse limite réglementaire dans cet emplacement est de 50 km/h.

4.6 Calcul des paramètres du trafic

Dans l'étude de la gestion d'un trafic routier, l'analyse des mesures fournies par les capteurs au centre de gestion du trafic doit pouvoir fournir un certain nombre de données (le débit, la vitesse, la classification, le taux d'occupation et le temps de présence ponctuel de véhicules) afin d'éviter ou de prévenir la congestion de la circulation routière.

À partir des mesures des nœuds capteurs, le débit du trafic s'obtient tout simplement par le nombre total de véhicules passés dans une voie de circulation pendant une période de temps.

La vitesse de passage d'un véhicule s'obtient à partir des mesures de deux nœuds capteurs. Connaissant la distance d séparant ces derniers et l'intervalle de temps Δt entre le passage du véhicule détecté par le premier nœud capteur et le passage du véhicule détecté par le deuxième nœud capteur, il est facile de déterminer la vitesse V de circulation du véhicule.

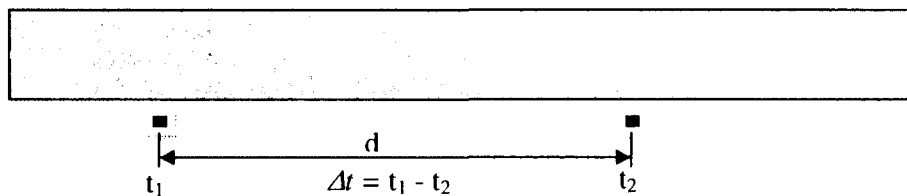


Figure 4.12- Schéma expérimental pour estimer la vitesse d'un véhicule

$$V = \frac{d}{\Delta t} \quad (4-2)$$

Dans l'exemple d'un véhicule où l'intervalle de temps est $\Delta t = 269$ ms pour un trajet de $d = 5$ mètres (distance séparant les deux nœuds capteurs), on a la vitesse $V = 67$ km/h.

Le temps de présence ponctuel est le temps de passage d'un véhicule au voisinage d'un nœud capteur. Ce temps est estimé par le nombre d'échantillons acquis par le nœud capteur lors du passage du véhicule. Si un nœud capteur détecte u fois le passage d'un véhicule pour une fréquence d'échantillonnage f , alors le temps de passage dt au voisinage de ce nœud capteur sera :

$$dt = \frac{u}{f} \quad (4-3)$$

La figure 4.13 (c) montre comment on détermine la valeur u . Cette valeur est le nombre d'échantillons qui présentent une valeur absolue de l'intensité du champ magnétique supérieure à 0.002 kA/m. la valeur u permet d'obtenir le temps de passage dt . Ce dernier est utilisé pour estimer la longueur l du véhicule par la relation :

$$l = v \cdot dt \quad (4-4)$$

Si dans l'exemple précédent (vitesse du véhicule à 67 km/h), le nœud capteur avait acquis 5 échantillons dont la valeur absolue de l'intensité du champ magnétique était supérieure à 0.002 kA/m; cela nous donnerait un $dt = 0,25$ seconde. La longueur du véhicule sera ainsi estimée à 4,65 mètres. De ce fait, le véhicule sera classifié dans la catégorie des gros véhicules car d'après les règlements fixés par le Gouvernement fédéral canadien, la longueur maximale d'un véhicule de passager doit être de 2,6 mètres.

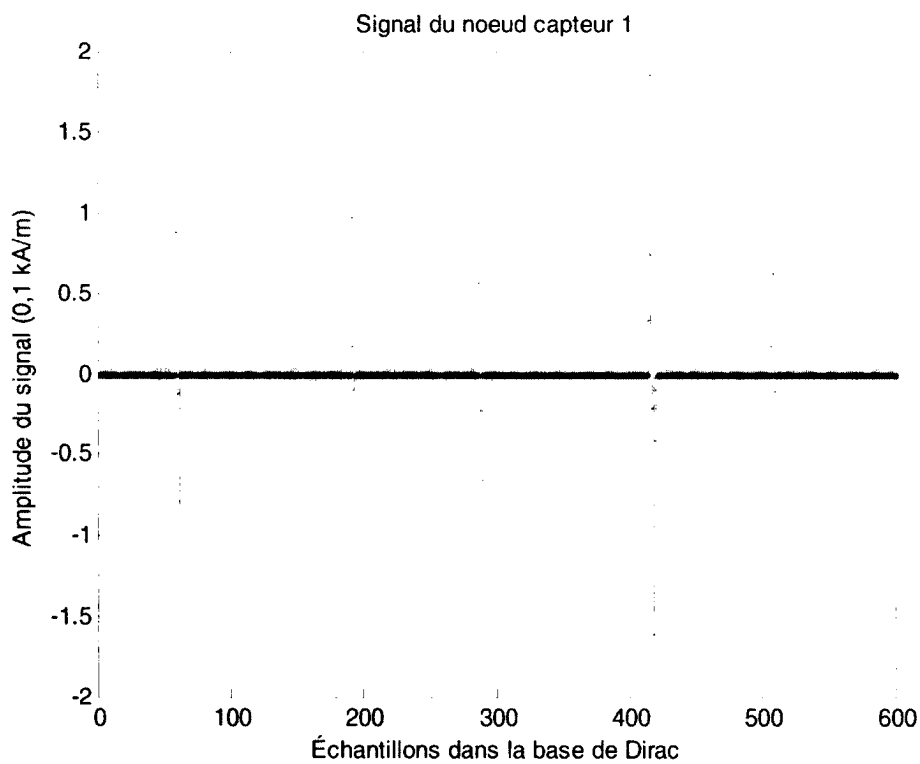
On peut se servir de cette référence pour classifier les véhicules en deux catégories :

- Pour tout véhicule dont la longueur est estimée à une valeur inférieur ou égale 2,6 mètres : petit véhicule ;
- Et pour tout véhicule dont la longueur est estimée à une valeur supérieure à 2,6 mètres : gros véhicule.

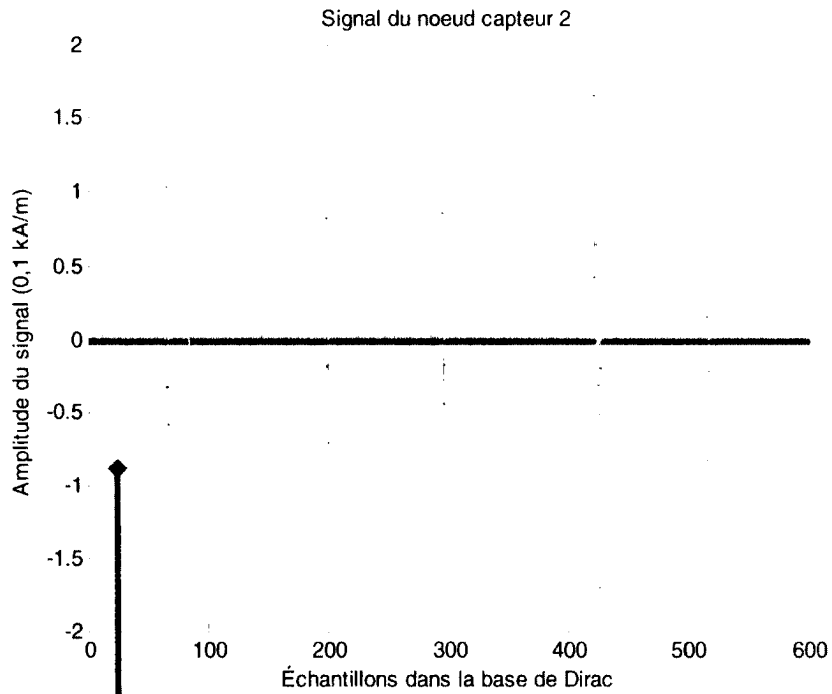
Nous n'avons pas étudié le cas des véhicules qui pourraient passer simultanément sur deux voies de circulation. Ça reste un domaine de recherche à explorer dans les travaux de recherche en perspective par une méthode de triangulation des signaux obtenus par trois nœuds capteurs.

Nous avons ainsi programmé les nœuds capteurs tel qu'expliqué à la section précédente à acquérir les signaux à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz afin de ne pas manquer le passage d'un véhicule. À partir des images vidéo de la caméra, nous avons constaté que tous les véhicules ont été détectés par les deux nœuds capteurs. Durant cette expérience, 357 véhicules ont été détectés par les deux nœuds capteurs; ce qui nous donne un débit de trafic égale à 10,82 véhicules/minute.

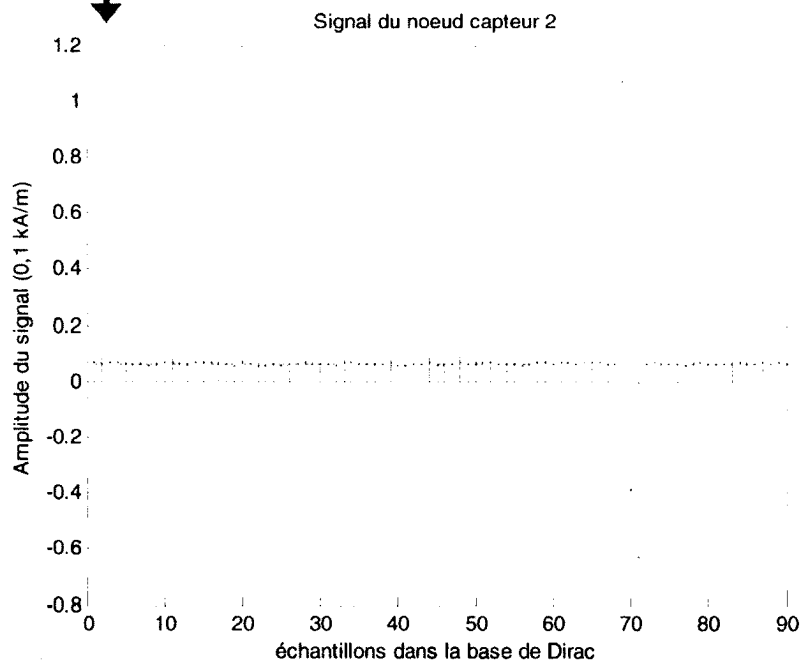
La figure 4.13 présente un extrait des signaux enregistrés par les deux nœuds capteurs durant une période de 30 secondes. Ces signaux sont la composante X du champ magnétique terrestre.



(a)



(b)



(c)

Figure 4.13 - Extrait des signaux enregistrés par les nœuds capteurs au bout de 30 secondes

Dans ces figures 4.13 (a) et 4.13 (b), les pics groupés représentent le passage des véhicules. On observe dans ces figures que pendant une période de 30 secondes, 5 véhicules se sont déplacés sur la chaussée. En effectuant des calculs tels qu'expliqué précédemment pour déterminer les paramètres du trafic, on obtient des résultats présentés dans le tableau 4.2. Par ailleurs, grâce aux données enregistrées par la caméra vidéo, nous avons identifié les véhicules à partir des signaux enregistrés par les nœuds capteurs.

La figure 4.13 (c) est un agrandissement des 90 premiers échantillons du nœud capteur 2. Durant toute la phase d'expérimentation, on a observé comme le montre la figure 4.13 (c), qu'en l'absence des véhicules, les nœuds capteurs acquéraient des signaux dont la valeur absolue de l'intensité du champ magnétique était de l'ordre de 0.0078 kA/m à 0.0089 kA/m. En présence des véhicules, ces nœuds capteurs acquéraient les signaux dont la valeur absolue de l'intensité du champ magnétique était supérieure à 0.02 kA/m. On s'est servi de cette métrique pour déterminer le nombre u lorsqu'on observait plusieurs pics de signaux groupés dans un endroit. Pour la figure 4.13 (c) par exemple, on observe le passage d'un seul véhicule. Le nœud capteur 2 a détecté $u=3$ fois le passage de ce véhicule. Comme on l'a déjà expliqué précédemment, la valeur u , permet de déterminer le temps de passage dt au voisinage du nœud capteur et la longueur l dudit véhicule.

Tableau 4.2 - Résultat du calcul des paramètres du trafic à partir de la figure 4.12

Véhicule	Vitesse estimée	Temps de présence	Longueur estimée	Classification avec nœud capteur
1	60 km/h	0,15 ms	2,5 m	Petit véhicule
2	51 km/h	0,15 ms	2,3 m	Petit véhicule
3	60 km/h	0,15 ms	2,5 m	Petit véhicule
4	45 km/h	0,35 ms	4,4 m	Gros véhicule
5	40 km/h	0,2 ms	2,2 m	Petit véhicule

Durant la phase d'expérimentation, un total de 357 véhicules a été détecté par la caméra vidéo et les nœuds capteurs. À partir des signaux enregistrés par ces derniers, nous avons déterminé les paramètres du trafic. Le tableau 4.3 présente la répartition des résultats obtenus.

Tableau 4.3 - Répartition des résultats obtenus par les nœuds capteurs

Véhicule	Vitesse estimée inférieure ou égale à 50 km/h	Vitesse estimée supérieure à 50 km/h	Petite véhicule	Gros véhicule
Quantité	221	136	338	19

La répartition des résultats obtenus par la caméra vidéo est présentée dans le tableau 4.4.

Tableau 4.4 - Répartition des résultats obtenus par la caméra vidéo

Type de Véhicules	Véhicules passager	Bus	Semi-remorque
Quantité	349	7	1

Les résultats des tableaux 4.2, 4.3 et 4.4 montrent l'utilité des réseaux de capteurs sans fil pour la gestion du trafic routier. À partir de ces informations (nombre de véhicules sur une période, estimation de la vitesse, la longueur et le temps de présence ponctuel des véhicules) en temps réels, on peut prévenir la congestion de la circulation par une bonne gestion des feux tricolores sur des voies de circulations; informer les usagers sur l'état du trafic tout en leurs donnant des conseils sur les itinéraires à emprunter suivant les directions.

Au chapitre suivant, on procédera à des simulations d'acquisition de ces signaux par la technique de l'échantillonnage compressif. Ceci dans l'objectif de montrer qu'on peut acquérir moins d'échantillons des signaux dans une certaine base et obtenir les mêmes résultats que ceux présentés dans ce chapitre.

CHAPITRE 5 Simulations de l'échantillonnage compressif

5.1 Principe

L'échantillonnage compressif est une nouvelle technique d'échantillonnage qui permet sous certaines conditions de reconstruire les signaux à partir d'un très petit nombre d'échantillons. L'approche exploite le fait que les signaux ayant une représentation parcimonieuse dans une certaine base Ψ peuvent être reconstruits à partir d'un nombre limitée de projections sur une deuxième base Φ , incohérente avec la première.

Dans l'expérimentation de détection de véhicules effectuée dans ce projet, on constate que les signaux acquis par les nœuds capteurs dans le domaine temporel (base de Dirac) sont parcimonieux car ils présentent très peu de coefficients significatifs (figure 4.16). Le fait que ces signaux présentent un caractère parcimonieux dans la base de Dirac, est une propriété essentielle pour l'application de l'échantillonnage compressif dans ce type d'application des réseaux de capteurs sans fil. De ce fait, on pourrait à partir de l'unité de traitement du nœud capteur, convertir ces signaux dans une base incohérente à la base de Dirac telle la base de Fourier et sélectionner de manière aléatoire un petit nombre de coefficients de Fourier par rapport à la dimension du signal pour l'envoyer à la station de base.

Ainsi, à partir de ce petit nombre de coefficients de Fourier, on utilisera des algorithmes d'optimisation convexe pour reconstruire les signaux dans le domaine temporel sans perte d'information utile.

Le fait qu'un nœud capteur aura transmis ce petit nombre limité de coefficients de Fourier par rapport à la taille du signal, il va économiser en énergie et par conséquent augmenter sa durée de vie.

La figure 5.1 présente le synoptique d'acquisition et de reconstruction des signaux selon le protocole de l'échantillonnage compressif.

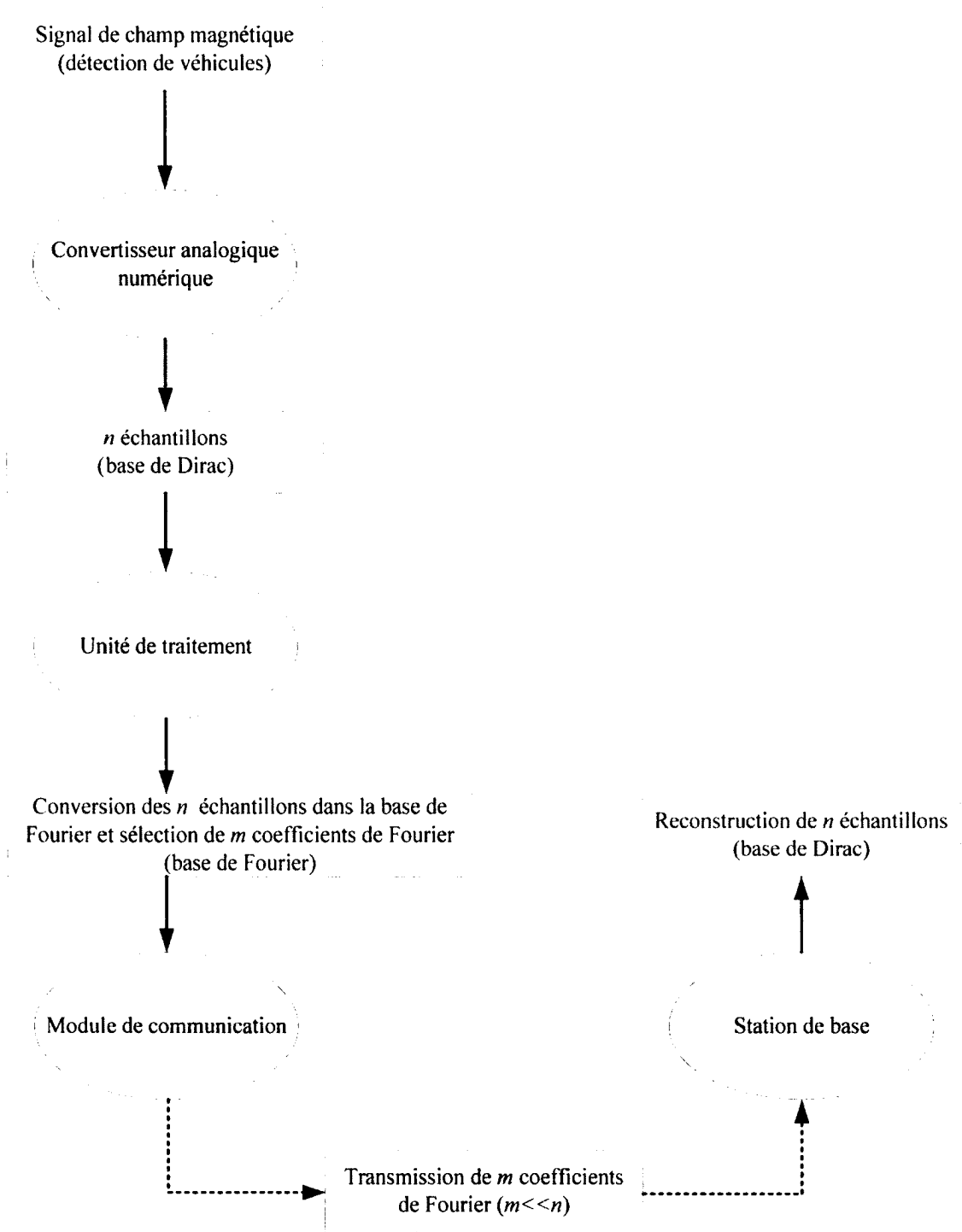


Figure 5.1 – Synoptique de l'échantillonnage compressif

5.2 Bases d'acquisition et de représentation des signaux

Le choix des bases d'acquisition et de représentation des signaux est une étape essentielle pour l'application de l'échantillonnage compressif. Ces deux bases doivent être incohérentes l'une de l'autre. Par ailleurs, la base de représentation doit être celle qui présente les propriétés de parcimonie.

Pour des simulations de l'échantillonnage compressif sur des signaux de détection de véhicules obtenus par les nœuds capteurs, on a utilisé la base de Fourier comme base d'acquisition et la base de Dirac comme base de représentation car les signaux présentent des propriétés de parcimonie dans celle-ci. Ainsi, avant de procéder à des simulations de l'échantillonnage compressif, on a d'abord converti les signaux échantillonnés dans le domaine temporel en coefficients de Fourier.

La transformée de Fourier discrète (TFD) est l'outil mathématique qui permet d'effectuer la transformée de Fourier sur des signaux échantillonnés à des intervalles de temps discrets comme ceux des signaux acquis à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz par les nœuds capteurs pour la détection de véhicules sur la chaussée afin de ne pas rater le passage d'un véhicule se déplaçant sur ce tronçon routier.

L'expression mathématique $X(k)$ de la TFD pour un signal x de n échantillons est la suivante :

$$X(k) = \sum_{i=0}^{n-1} x(i) \cdot e^{-2j\pi k \frac{i}{n}} \quad \text{pour } 0 \leq k < n \quad (5-1)$$

L'opération inverse est également possible sans perte de données puisqu'il y'a conservation de l'énergie par les algorithmes. L'expression mathématique de la transformée inverse est la suivante :

$$x(i) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} X(k) \cdot e^{2j\pi i \frac{k}{n}} \quad \text{pour } 0 \leq k < n \quad (5-2)$$

À partir de l'équation (5-1), il est donc possible d'obtenir une représentation spectrale discrète (spectre échantillonné) du signal échantillonné x sur une fenêtre de temps finie (échantillonnage borné dans le temps).

On peut aussi normer la TFD et la TFD inverse par $1/\sqrt{N}$. Le but de la normalisation est également de pouvoir retrouver le signal original par la TFD inverse de sa TFD. Dans ce cas, l'équation (5-1) devient :

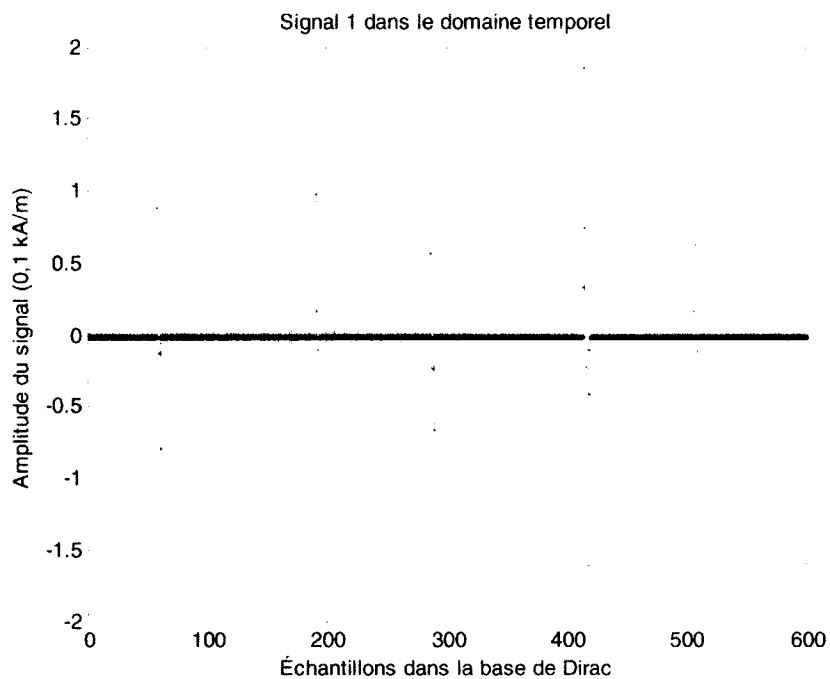
$$X(k) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} x(i) \cdot e^{-2j\pi k \frac{i}{n}} \quad \text{pour } 0 \leq k < n \quad (5-3)$$

Il est possible de calculer une TFD sur un microcontrôleur standard (DSP : *Digital Signal Processor*). Ainsi, en utilisant un nœud capteur qui dispose d'un DSP, on peut ajouter un algorithme FFT (*Fast Fourier Transform*) dans le programme principal qui va calculer les coefficients de Fourier. Pour chaque n échantillons numériques à la sortie du convertisseur analogique numérique, l'algorithme FFT implanté dans la DSP retournera n coefficients de Fourier.

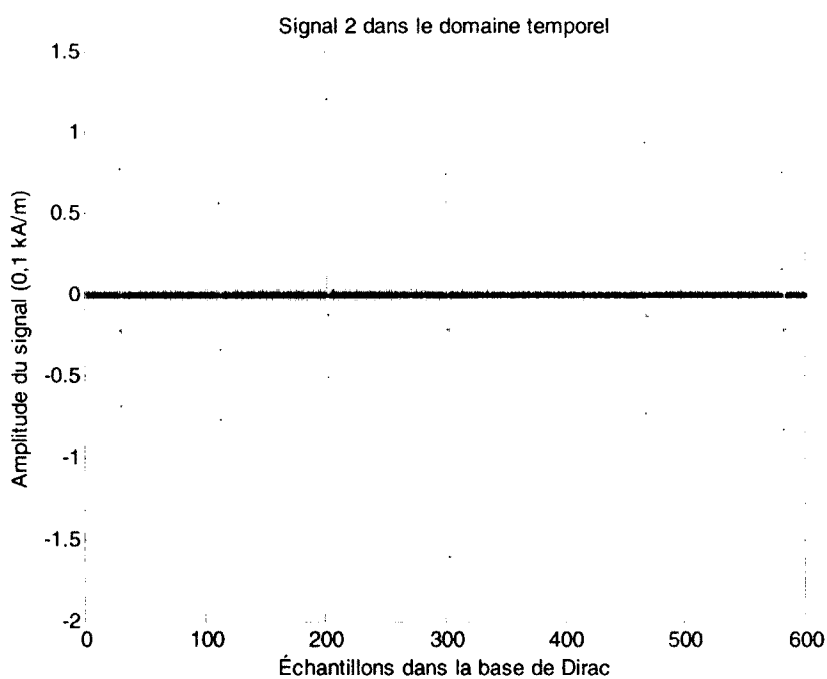
L'échantillonnage compressif suggère de prendre un petit nombre de données de façon aléatoire dans une base incohérente à la base où le signal a une représentation parcimonieuse. Dans le cas d'espèce, c'est dans la base de Fourier qu'on peut prendre ce petit nombre de données et effectuer par la suite une projection de ces données dans la base de Dirac (domaine temporel).

Dans les figures 5.2 - (a), (b) et (c) où un extrait des signaux sont représentés dans la base de Dirac, on constate qu'il y'a très peu de coefficients significatifs par rapport à la taille du signal. On observe juste 18 coefficients significatifs sur la figure 5.2 (a), 19 coefficients significatifs sur la figure 5.2 (b) et 15 coefficients significatifs sur la figure 5.2 (c) pour un total de 600 échantillons pour chacun des extraits de signaux. Lorsqu'on effectue une projection de ces signaux sur la base de Fourier (Figure 5.3 - (a), (b) et (c)), on observe plutôt que la majorité des coefficients sont significatifs. C'est ce phénomène d'inverse de coefficients significatifs d'une base à l'autre qui justifie le choix de la paire des bases Dirac –

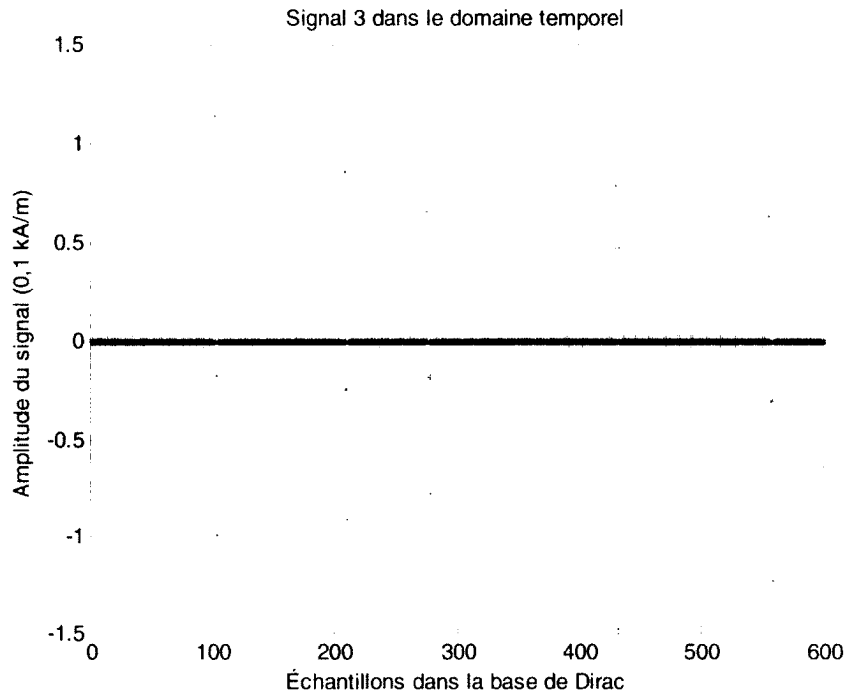
Fourier dans l'utilisation de l'échantillonnage compressif pour la détection de véhicules par un réseau de capteurs sans fil.



(a)



(b)

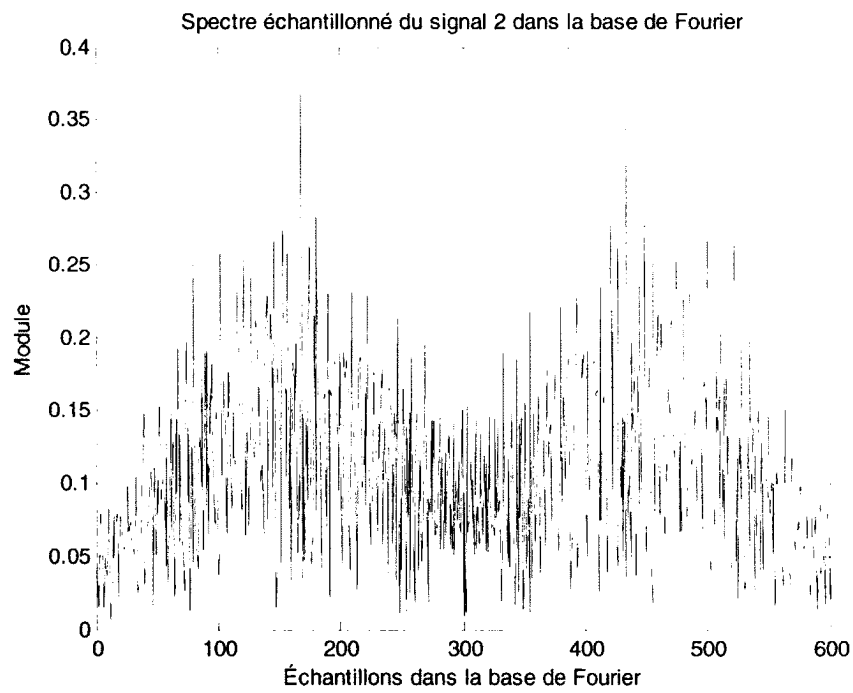
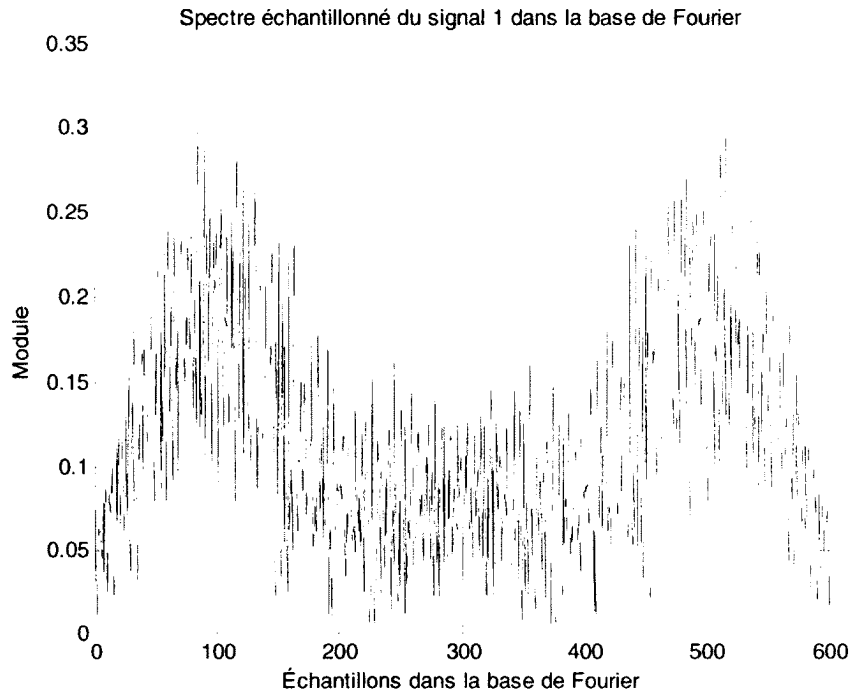


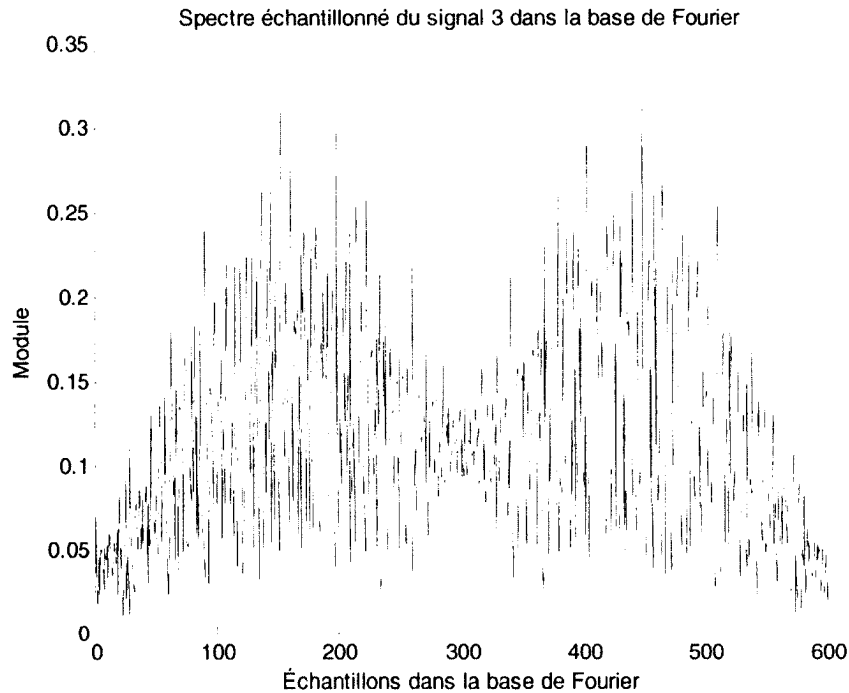
(c)

Figure 5.2 - Trois extraits du signal d'un nœud capteur enregistrés au bout de 30 secondes

On peut constater à travers la figure 5.2 que les signaux acquis par le nœud capteur sont parcimonieux dans le domaine temporel car il y'a peu d'échantillons non nuls par rapport à leurs tailles. À l'exemple du signal (a) de la figure 5.2, on observe 18 échantillons non nuls sur 600 pris par les nœuds capteurs durant une période de temps de 30 secondes.

La représentation spectrale (module des coefficients de Fourier) de ces signaux, obtenue à l'aide du progiciel Matlab nous donne ceci :





(c)

Figure 5.3 - Représentation spectrale des signaux

On peut remarquer à partir de la figure 5.2 et la figure 5.3 que les deux bases sont incohérentes car les signaux présentent un caractère parcimonieux dans la base de Dirac mais non dans la base de Fourier. Ces deux bases présentent un maximum d'incohérence car la mesure de cohérence de ces deux bases est $\mu=1$ (la cohérence entre la base de Fourier et la base de Dirac est en effet la plus petite qu'on puisse calculer à l'aide de Matlab). L'échantillonnage compressif trouve son intérêt avec des paires de bases fournissant une faible cohérence comme celle de la paire de bases Dirac - Fourier.

5.3 Matrice modélisant l'acquisition et la projection des signaux

Soit y le vecteur de m coefficients de Fourier à prendre de façon aléatoire suivant une loi uniforme, Φ la matrice $m \times n$ modélisant l'acquisition de ces m coefficients de Fourier, Ψ la matrice permettant la projection des signaux (pris dans la base de Dirac) dans la base de Fourier, X la séquence des n coefficients du signal dans la base de Fourier et x le vecteur de n

valeurs échantillonnées du signal dans la base de Dirac acquis par le nœud capteur ($m \ll n$).
On a l'équation suivante :

$$y = \Phi \cdot X = \Phi \cdot \Psi \cdot x = A \cdot x \quad (5-4) \quad \text{avec}$$

$$A = \Phi \cdot \Psi, \quad X = \Psi \cdot x, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \varphi(1,1) & \cdot & \cdot & \cdot & \varphi(n,1) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \varphi(1,n) & \cdot & \cdot & \cdot & \varphi(n,n) \end{bmatrix} \quad \varphi(i,t) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \exp\left(\frac{-2j\pi it}{n}\right)$$

La matrice $A = \Phi \cdot \Psi$ est une application linéaire de R^m dans R^n avec pour colonnes $\{a_i\}_{i=1}^m$. À l'aide cette matrice A , on souhaite retrouver un vecteur x_0 tel que $y = A \cdot x_0$. Une hypothèse classique consiste à supposer que x_0 est parcimonieux c'est-à-dire qu'il a un petit nombre S de composantes non nulles, ce que l'on note $\|x_0\|_{l_0} \leq S$. on est ainsi amené à résoudre :

$$\min_{x \in R^n} \|x\|_{l_0} \quad \text{sous la contrainte} \quad A \cdot x = y \quad (5-5)$$

Ce problème combinatoire est algorithmiquement insoluble et on considère à la place la solution suivante :

$$\min_{x \in R^n} \|x\|_{l_1} \quad \text{sous la contrainte} \quad A \cdot x = y \quad (5-6)$$

5.4 Implémentation

Pour effectuer des simulations d'acquisition suivant le protocole de l'échantillonnage compressif sur des signaux enregistrés par le nœud capteur pour la détection de véhicules, on a implémenté un programme dans l'environnement de développement Matlab 9.0. Ce dernier fonctionnant sur un ordinateur possédant un processeur Intel Pentium (M) de 1.73 GHz avec 2 Go de RAM. Le programme fonctionne en trois étapes :

- La construction d'une matrice modélisant les mesures dans la base de Fourier à partir des signaux pris par le nœud capteur;
- L'utilisation d'un algorithme de reconstruction par la minimisation selon la norme l_1 ;

- Une comparaison avec l'utilisation d'un algorithme de reconstruction par la minimisation selon la norme l_2 .

Dans la reconstruction des signaux, le principe consiste à approcher y par une combinaison de vecteurs de A dont la norme l_1 est faible tout en supposant que la solution x_0 admet un petit de composantes non nulles.

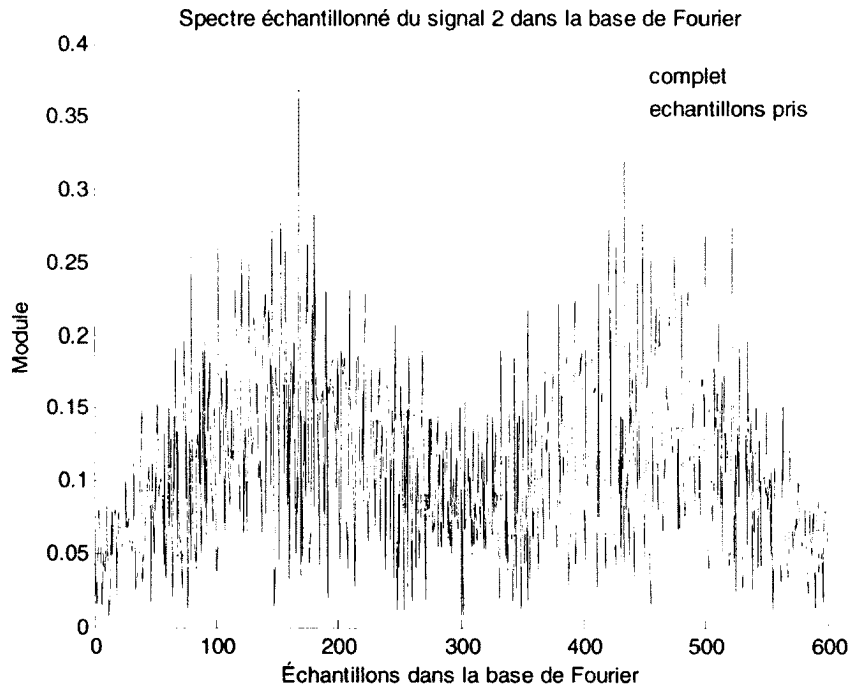
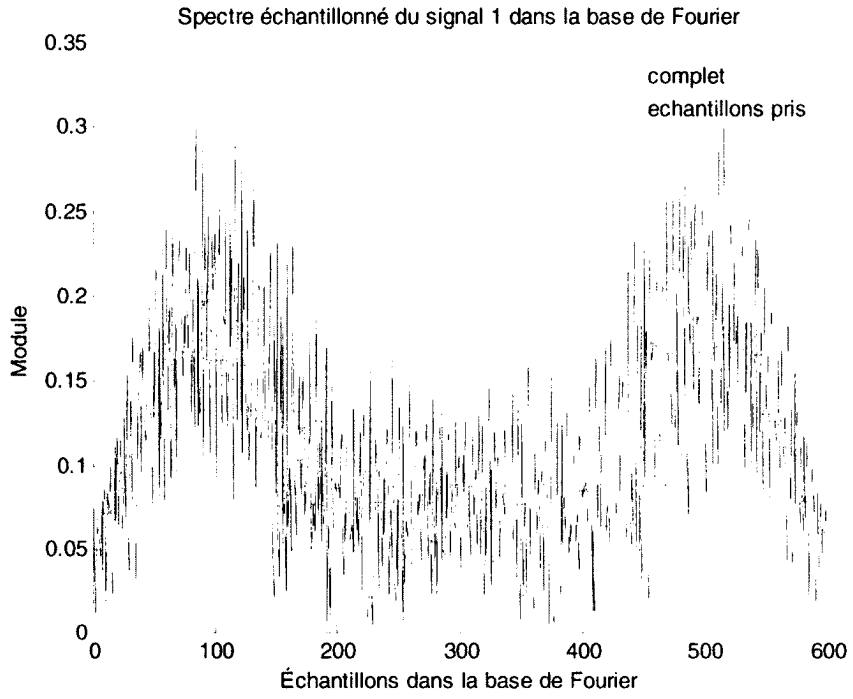
La matrice A est formée d'exponentielles complexes, de fréquences discrètes choisie de façon aléatoire suivant une loi uniforme par la fonction *randsample* du progiciel utilisé Matlab. Cette matrice A est une matrice de type Fourier inverse. Ainsi, à partir de la petite quantité de coefficients de Fourier, on va les projeter dans la base de Dirac dans l'objectif de retrouver la série temporelle du signal détecté par le nœud capteur.

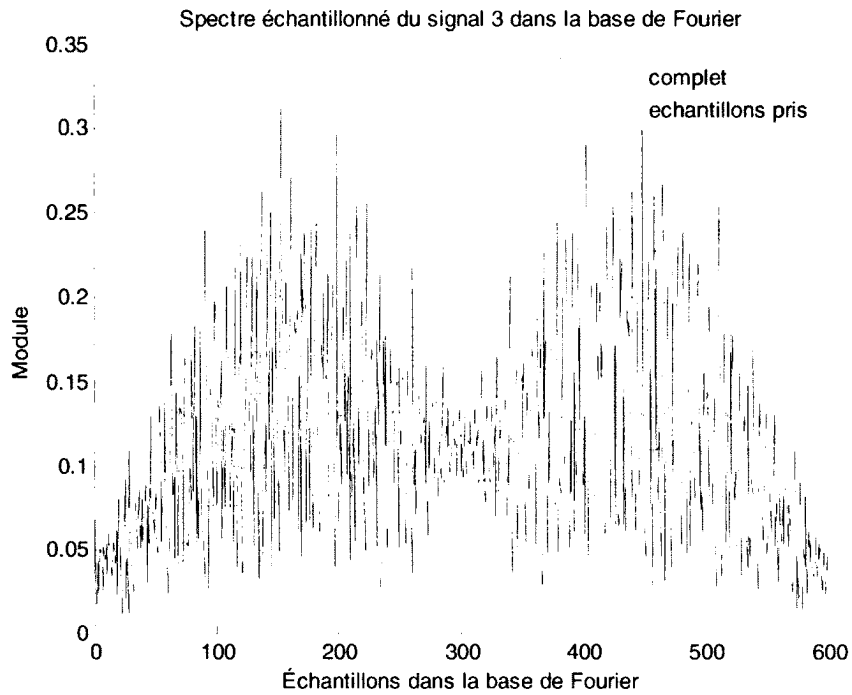
Pour la résolution de ce problème de minimisation de la norme l_1 , on a utilisé les outils d'optimisation convexe *CVX* développé par Michael Grant and Stephen Boyd [22]

5.5 Résultats

D'après le théorème de l'échantillonnage compressif, il faut acquérir un nombre de données de l'ordre de $m = C \cdot S \cdot \log(n)$ pour reconstruire le signal (C étant une constante positive, S le nombre de coefficients non nuls dans la base de temps et n la taille du signal).

Plusieurs simulations pour différents valeurs de la constante de C ont été effectuées sur 67 extraits de signaux de 30 secondes enregistrés par les nœuds capteurs. On a obtenu de bons résultats de simulations pour $C = 0,4$. La figure 5.4 présente le spectre de valeurs échantillonnées des signaux de la figure 5.2 et les m échantillons (pour $C = 0,4$) de ce spectre qui ont été pris de façon aléatoire selon une loi uniforme afin de pouvoir effectuer une projection de ces échantillons dans le domaine temporel. Pour le signal 1 (a) par exemple, $m = 49$ car $S=19$ tandis que pour le signal 3 (c) $m=39$ car $S=15$.

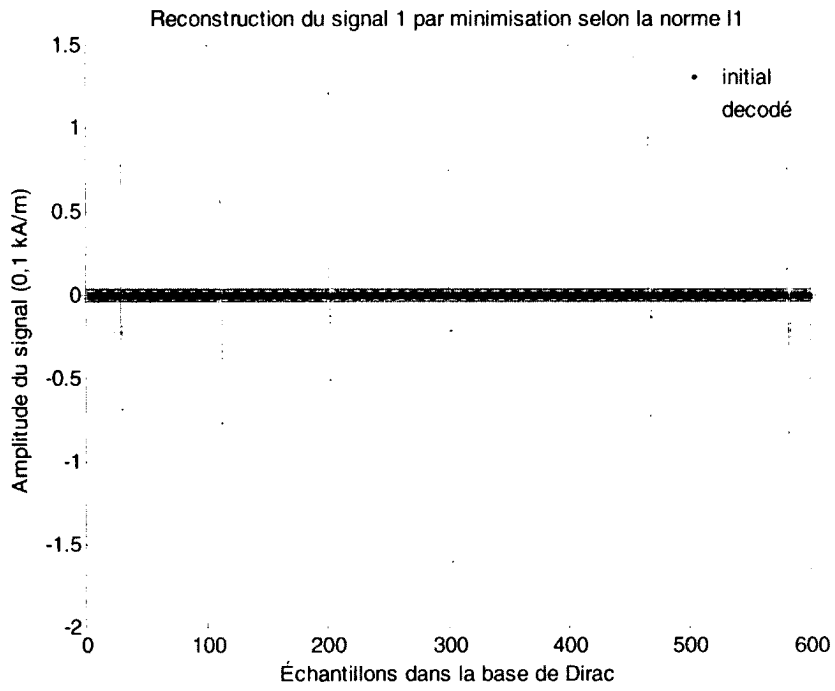




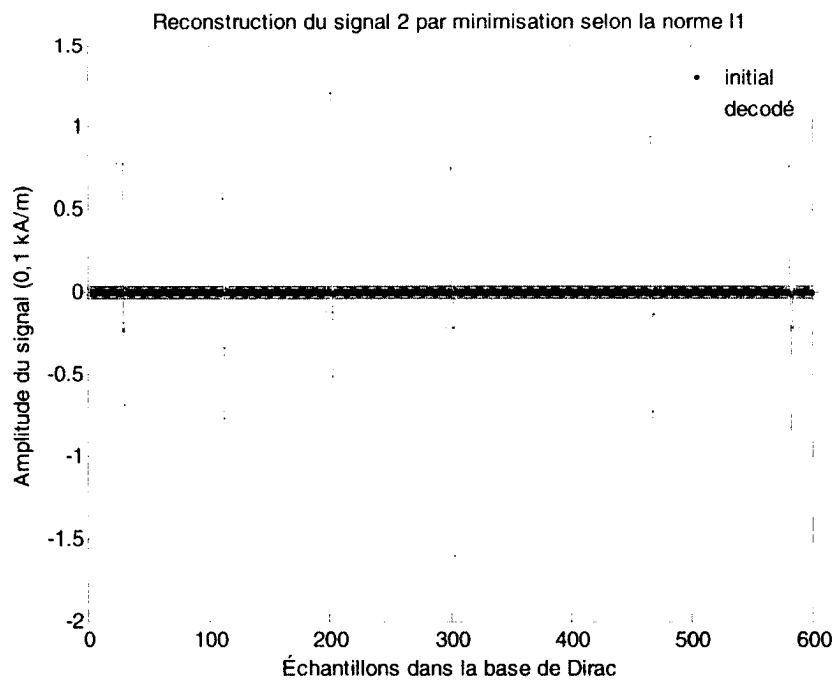
(c)

Figure 5.4 - Échantillons des signaux pris aléatoirement dans la base de Fourier

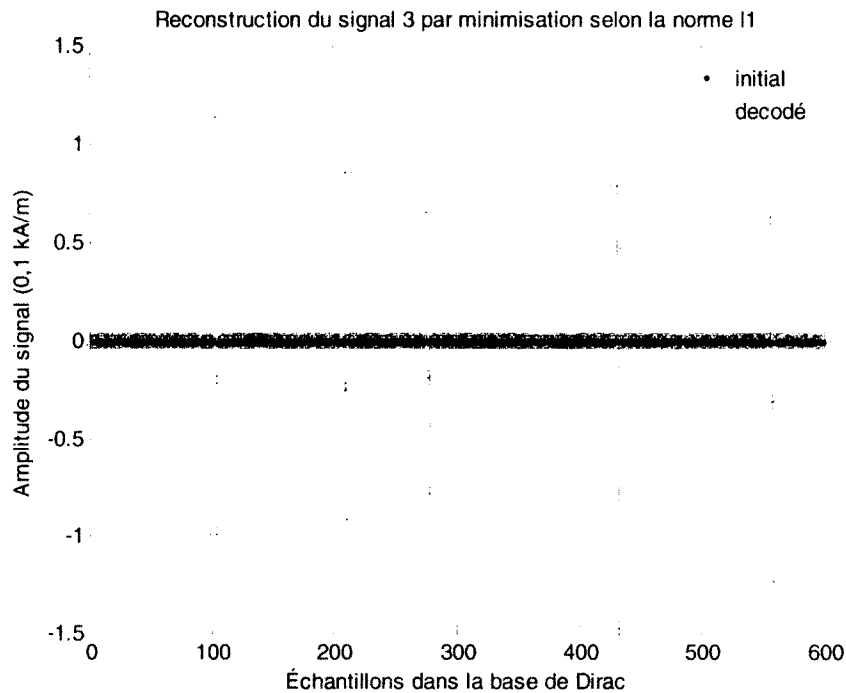
La figure 5.5 présente la reconstruction obtenue à partir de $m (0,4 \cdot S \cdot \log(n))$ coefficients de Fourier, par minimisation de la norme l_1 .



(a)



(b)



(c)

Figure 5.5 - Reconstruction des signaux par minimisation de la norme l_1

On observe à travers la figure 5.5 que la reconstruction des signaux avec la minimisation de la norme l_1 donne des résultats comparables à celles enregistrés initialement par le nœud capteur, et ce avec un nombre de mesures beaucoup moins important présentant un faible taux d'erreur de reconstruction. Ceci se fait bien évidemment au prix d'une complexité algorithmique important et d'hypothèses sur des quantités à reconstruire.

On peut évaluer le taux d'erreur de reconstruction de ces signaux par la relation suivante :

$$\varepsilon = \frac{\|x - x_0\|_{l_1}}{\|x\|_{l_1}} \quad (5-7)$$

x : échantillons du signal original

x_0 : échantillons du signal décodé (reconstruit)

Le tableau 5.1 présente le taux d'erreur de reconstruction (ϵ) de ces signaux par minimisation selon la norme l_1 .

Tableau 5.1 - Taux d'erreur de reconstruction des signaux

Signaux	Taux d'erreur de reconstruction (ϵ)
Signal 1 (a)	$4,5996 \cdot 10^{-9}$
Signal 2 (b)	$1,0295 \cdot 10^{-9}$
Signal 3 (c)	$4,7150 \cdot 10^{-9}$

La figure 5.6 présente le taux d'erreur de reconstruction des extraits de signaux de la figure 5.3 suivant la minimisation de la norme l_1 en fonction de la constante C .

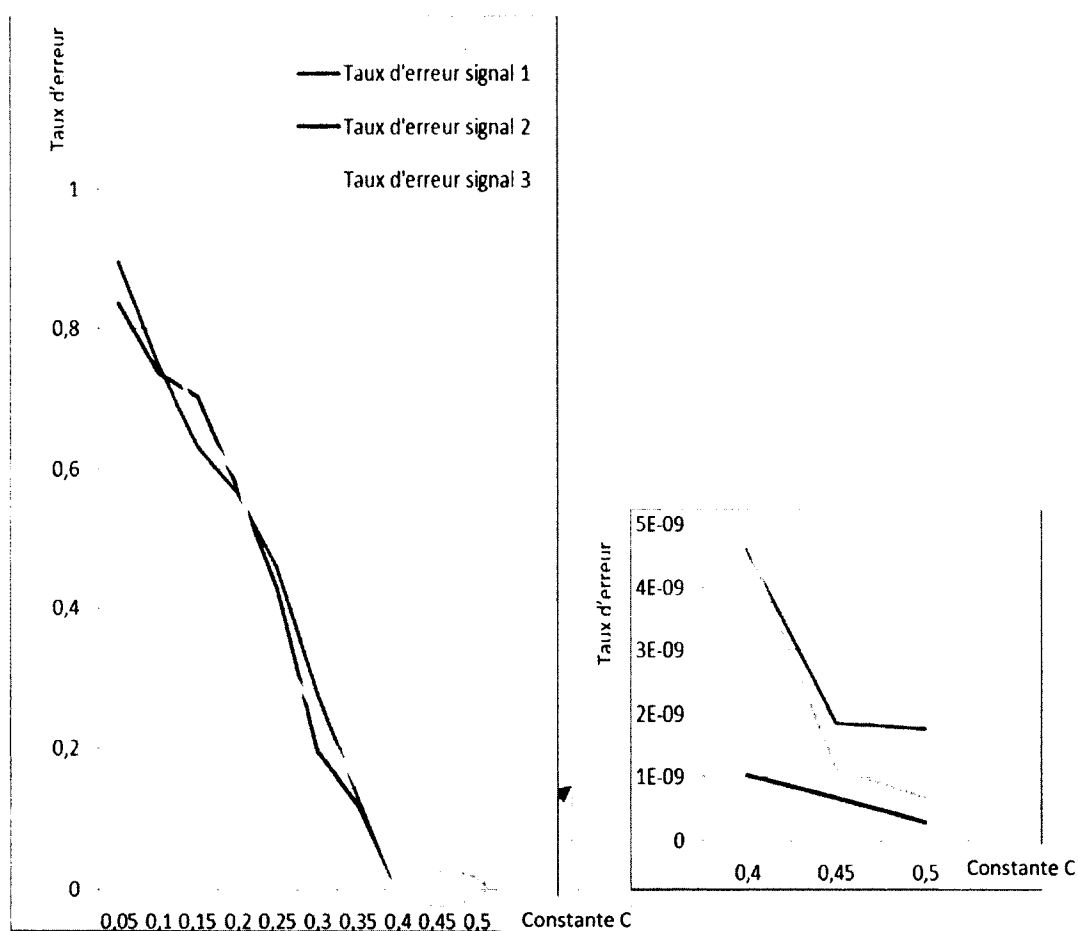


Figure 5.6 – Taux d'erreur de reconstruction des signaux

On observe sur la figure 5.6 que l'erreur de reconstruction devient négligeable pour une constante $C = 0,4$ pour les trois extraits du signal. Il en est de même pour les autres signaux récoltés par les nœuds capteurs sur la chaussée.

Au regard des résultats précédents et ceux effectués pour une série de signaux récoltés par les nœuds capteurs, on a bien observé l'intérêt de l'utilisation de la technique de l'échantillonnage compressif par les réseaux de capteurs sans fil pour la détection de véhicules qu'est celui de réduire la quantité de données envoyées à la station de base par les nœuds capteurs; ceci dans le but de minimiser l'énergie consommé par les nœuds capteurs qui aura comme conséquence l'augmentation de la durée de vie des nœuds capteurs. Cette réduction de quantité de données (ou compression) s'exprime généralement sous forme d'un taux dit « taux de compression ». Ce dernier (T) peut s'énoncer en pourcentage du volume après réduction par rapport au volume de données initiales :

$$T = 100 \cdot \left(1 - \frac{m}{n}\right)\% \quad (5-8)$$

m : nombre des échantillons du signal de la technique du CS

n : nombre des échantillons du signal original

Le tableau 5.2 présente le taux de compression des signaux par la reconstruction avec la minimisation de la norme l_1 .

Tableau 5.2 - Taux de compression des signaux

Signaux	Quantité (m)	Taille du signal (n)	Taux de compression
Signal(a)	49	600	91,83 %
Signal (b)	49	600	91.83 %
Signal (c)	39	600	93.5 %

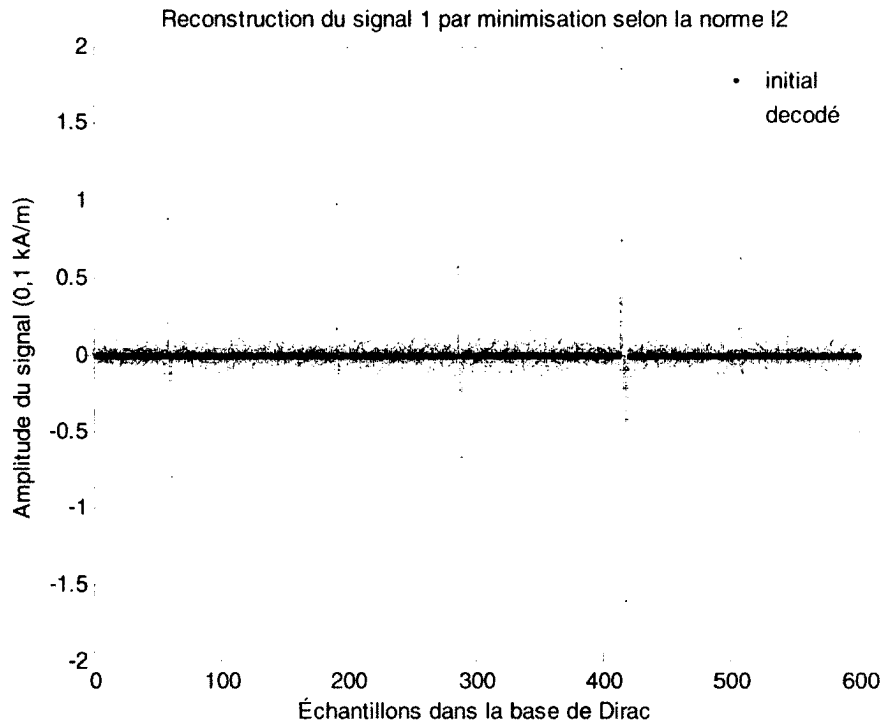
On a montré au chapitre 2 de ce document que la consommation d'énergie d'un nœud capteur est quasi proportionnel au nombre de transmission de données. On remarque à travers les résultats du tableau 5.2 qu'on peut améliorer davantage la minimisation de consommation

d'énergie par l'utilisation de la technique de l'échantillonnage compressif en prenant moins de données de façon aléatoire.

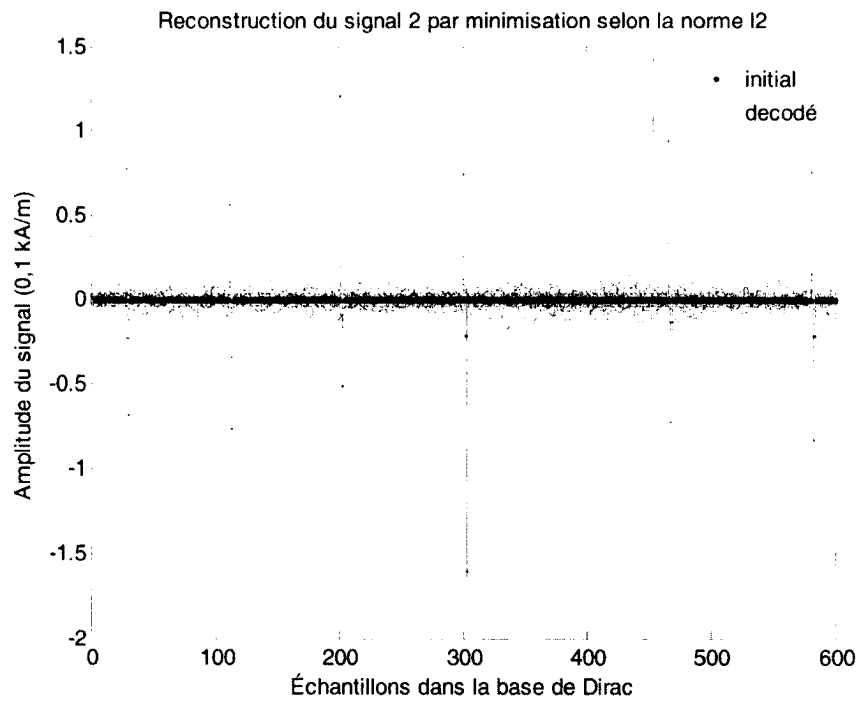
Cependant, lorsqu'on utilise la technique de l'échantillonnage compressif, on ne connaît pas à l'avance le nombre S de composantes non nulles du signal qui nous permettra de déterminer la quantité m d'échantillons qu'on doit acquérir afin de reconstruire le signal. Pour une détection de véhicules sur la chaussée, on peut se servir de certains paramètres pour estimer cette quantité S . D'après le code de la route, l'intervalle minimum entre deux véhicules doit être de 2 secondes. Ainsi, pour des extraits de signaux de 30 secondes, on peut estimer la quantité S à 30 (détection double d'un véhicule), ce qui nous donne une quantité $m = 77$ pour une constante $C = 0,4$. Si on se place sous cette hypothèse, on aura un taux de compression de données de 87,16 %.

La transmission de données étant quasiment proportionnelle à la consommation d'énergie du nœud capteur, on peut sauver un gain d'énergie et donc augmenter la durée de vie des nœuds capteurs si on utilise le protocole de l'échantillonnage compressif pour la détection de véhicules par un réseau de capteur sans fil.

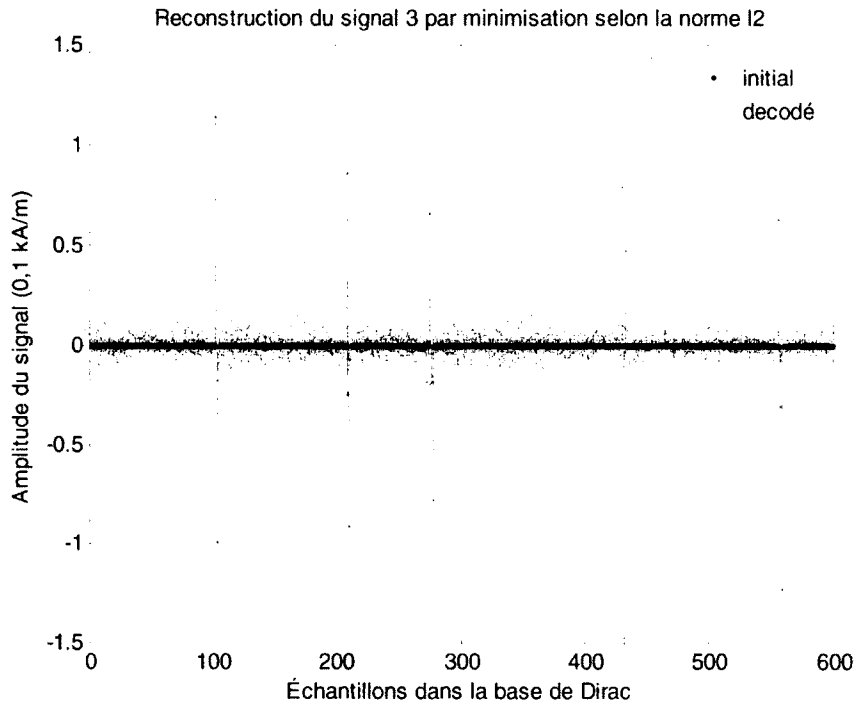
Dans ce projet, on a également effectué des simulations de reconstruction des signaux avec la minimisation selon la norme l_2 . La figure 5.6 présente la reconstruction obtenue à partir de m ($0,4 \cdot S \cdot \log(n)$) coefficients de Fourier, par minimisation de la norme l_2 .



(a)



(b)



(c)

Figure 5.7 - Reconstruction des signaux par minimisation de la norme l_2

On observe à travers la figure 5.7 que la reconstruction des signaux avec la minimisation de la norme l_2 ne donne pas de bons résultats comme ceux de la reconstruction avec la minimisation de la norme l_1 . Le tableau 5.3 présente d'ailleurs le taux d'erreur de reconstruction (ϵ) de ces signaux par minimisation selon la norme l_2 .

Tableau 5.3 - Taux d'erreur de reconstruction des signaux

Signaux	Taux d'erreur de reconstruction (ϵ)
Signal 1 (a)	0,9008
Signal 2 (b)	0,8309
Signal 3 (c)	0,8387

CHAPITRE 6 Conclusion

Les réseaux de capteurs sans fil suscitent un intérêt croissant pour la gestion du trafic routier. Toutefois, ils doivent aussi faire face à d'importants défis de conception en raison de leurs capacités de calcul et de stockage limitées et surtout de leur dépendance à l'égard d'une énergie limitée fournie par une batterie. L'énergie est une ressource critique et constitue souvent un obstacle majeur au déploiement des réseaux de capteurs. En effet, la durée de vie d'un réseau de capteurs est étroitement liée à la vie nodale. Cette dernière, quant à elle, dépend essentiellement de la consommation d'énergie du nœud. Le but des recherches dans ce type de réseau est de concevoir des techniques de conservation d'énergie afin de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

Dans ce projet de recherche, on a justifié l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil pour la détection de véhicules par rapport aux autres systèmes d'informations routiers et présenté les concepts et architectures généraux des réseaux de capteurs sans fil en général. Dans ce dernier, on observe que le principal problème à résoudre est de réduire la quantité de transmission de données afin d'augmenter la durée de vie des nœuds capteurs qui disposent de faibles ressources énergétiques. De ce fait, l'utilisation d'une technique d'acquisition et de compression de données tel que le protocole de l'échantillonnage compressif dont on a présenté les concepts fondamentaux au premier chapitre de ce document, est une solution potentielle pour augmenter la durée de vie des nœuds capteur puisque la compression amène mécaniquement à une réduction du nombre de données à transmettre par les nœuds capteurs.

L'application de l'échantillonnage compressif doit être précédée de l'étude des signaux à mesurer et en particulier celle de leurs propriétés de parcimonie. De ce fait, on a procédé à une étude expérimentale sur le terrain en utilisant un réseau de capteurs sans fil de la compagnie allemande coalesenses pour enregistrer les signaux de champ magnétique terrestre dans le but de détecter le passage des véhicules. Par la suite, on a analysé les extraits des signaux prélevés et effectué les simulations d'acquisition et de reconstruction de signaux par la technique de l'échantillonnage compressif. Les résultats obtenus ont été très satisfaisants,

car à travers des simulations, un nombre faible de mesures par rapport à la taille des signaux a permis de reconstruire les signaux originaux sans perte perceptuelle.

L'échantillonnage compressif est une méthode résultant d'une analyse mathématique complexe, mais relativement simple à mettre en œuvre dans son implémentation. L'algorithme étudié dans ce document, est la minimisation selon la norme l_1 . Ce dernier n'est pas le seul moyen de récupérer des solutions parcimonieuses; d'autres méthodes, telles que les algorithmes *Basic Matching Pursuit* (ou *Matching Pursuit*) et l'*Orthogonal Matching Pursuit* pourraient être étudiés. Cela pourrait constituer un axe de recherche futur dans la ligne avec ce travail.

Comme extension à ce travail, il serait également pertinent d'explorer l'applicabilité de l'échantillonnage compressif dans plusieurs applications des réseaux de capteurs sans fil routiers, incluant les capteurs environnementaux. Bien entendu, il serait nécessaire d'évaluer d'abord, lesquels des signaux acquis obéissent aux propriétés de parcimonie.

Ces axes de travaux futurs permettraient d'enrichir les résultats de recherche que nous avons présentés dans ce projet, par une gamme plus large d'applications où il est possible de prolonger, par le biais de la technique de l'échantillonnage compressif, la vie des capteurs divers installés sur la route, et ainsi en réduire le coût de maintenance.

Ce projet de recherche a aussi conduit à la rédaction d'un article scientifique qui a été soumis et accepté à IWCMC (*International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, Istanbul, 5-8 juillet 2011) [45].

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. et Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks*, volume 38, numéro 4, p. 393-422.
- [2] Ali, M., Bohm, A. et Jonsson, M. (2008). Wireless sensor networks for surveillance applications - A comparative survey of MAC protocols. Dans 4th International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2008, July 27, 2008 - August 1. Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, Athens, Greece, p. 399-403.
- [3] Baraniuk, R. G. (2007). Compressive sensing. *IEEE Signal Processing Magazine*, volume 24, numéro 4, p. 118-120+124.
- [4] Berkeley Wireless embedded systems (2004). The family of motes preceeding Telos and their capabilities. Dans <http://webs.cs.berkeley.edu/papers/hotchips-2004-mote-table.pdf> (page consultée le 03/28 2010).
- [5] Boukerche, A., Pazzi, R. W. N. et Araujo, R. B. (2005). HPEQ - A hierarchical periodic, event-driven and query-based wireless sensor network protocol. Dans IEEE Conference on Local Computer Networks - 30th Anniversary, LCN 2005, November 15, 2005 - November 17, volume 2005. IEEE Computer Society, Sydney, Australia, p. 560-567.
- [6] Candes, E. J., Romberg, J. et Tao, T. (2006). Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*, volume 52, numéro 2, p. 489-509.
- [7] Candes, E. J. et Wakin, M. B. (2008). An introduction to compressive sampling: A sensing/sampling paradigm that goes against the common knowledge in data acquisition. *IEEE Signal Processing Magazine*, volume 25, numéro 2, p. 21-30.
- [8] Candes, E. et Romberg, J. (2007). Sparsity and incoherence in compressive sampling. *Inverse Problems*, volume 23, numéro 3, p. 969-985.
- [9] Caruso, M. J. et Withanawasam, L. S. (1999). Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors. *Proceedings of SENSORS EXPO*,
- [10] Chien-Ming Chou, Chen-Yuan Li, Wei-Min Chien et Kun-chan Lan (2009). A feasibility study on vehicle-to-infrastructure communication: WiFi vs. WiMAX. Dans 2009 Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Services and Middleware (MDM 2009). IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 397-8.

- [11] Coalesenses (2009). Wireless Sensor Products. Dans iSense Wireless Sensor Network Hardware Modules. <http://www.coalesenses.com/index.php?page=isense-hardware> (page consultée le 04/03 2010).
- [12] Coalesenses (2009). Wireless Sensor Products. Dans Operating and Networking Firmware. <http://www.coalesenses.com/index.php?page=software-system> (page consultée le 04/03 2010).
- [13] Cornelius T. Leondes (2006). MEMS/NEMS : Handbook, techniques and applications. Springer, New York, USA, 2050 p.
- [14] Crossbow (2008). Wireless Sensors Network. Dans Classroom Kit http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/WSN_Classroom_Kit.pdf (page consultée le 04/01 2010).
- [15] Department of transportation Minnesota (2002). Evaluation of non-intrusive technologies for traffic detection, Final Report, St. Paul, USA.
- [16] Department of transportation of Minnesota (1999). Field test of monitoring of urban vehicle operations using non-intrusive technologies, Final report, St. Paul, USA.
- [17] Donoho, D. L. (2006). Compressed sensing. IEEE Transactions on Information Theory, volume 52, numéro 4, p. 1289-306.
- [18] Doherty, L., Wameke, B.A., Boser, B.E. et Pister, K.S.J. (2001). Energy and Performance Considerations for Smart Dust. International Journal of Parallel Distributed Systems and Networks, Volume 4, Number 3, p. 121-133.
- [19] Dubois-Ferriere, H., Meier, R., Fabre, L. et Metrailler, P. (2006). TinyNode: A comprehensive platform for wireless sensor network applications. Dans IPSN 2006: Fifth International Conference on Information Processing in Sensor Networks 2006, volume 2006. Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, 445 Hoes Lane - P.O.Box 1331, Piscataway, NJ 08855-1331, United States, p. 358-365.
- [20] G. Davis, S. Mallat et M. Avellaneda (1997). Adaptive greedy approximations . Constructive Approximation, volume 13, numéro 1, p. 57-98.
- [21] Dust Inc. (2009). Dust Network. Dans Products overview <http://www.dust-inc.com/> (page consultée le 04/02 2010).
- [22] Grant, M., et Boyd, S. (2011). Dans CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming. <http://cvxr.com/cvx/download/> (page consultée le 27/02/2011).

- [23] Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A. et Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. Dans The 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-33), January 4, 2000 - January 7. IEEE, Maui, USA, p. 223.
- [24] Huircan, J. I., Munoz, C., Young, H., Von Dossow, L., Bustos, J., Vivallo, G. et Toneatti, M. (2010). ZigBee-based wireless sensor network localization for cattle monitoring in grazing fields. *Computers and Electronics in Agriculture*, volume 74, numéro 2, p. 258-64.
- [25] Li, L. et Halpern, J. Y. (2001). Minimum-energy mobile wireless networks revisited. Dans International Conference on Communications (ICC2001), June 11, 2000 - June 14, volume 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, Helsinki, Finland, p. 278-283.
- [26] Lukin, K., Konovalov, V., Scherbakov, V. et Breed, R. (2006). Dedicated short-range communication system for vehicle-to-vehicle data transmission on the basis of chaotic waveform codes (DSRC-VVDT). Dans MIKON 2006. International Conference on Microwaves, Radar & Wireless Communications. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 1-4.
- [27] Lustig, M., Donoho, D. et Pauly, J. M. (2007). Sparse MRI: the application of compressed sensing for rapid MR imaging. *Magnetic Resonance in Medicine*, volume 58, numéro 6, p. 1182-95.
- [28] Microstrain (2009). Wireless sensor networks. Dans <http://www.microstrain.com> (page consultée le 04/03 2010).
- [29] Milenkovic, A., Otto, C. et Jovanov, E. (2006). Wireless sensor networks for personal health monitoring: issues and an implementation. *Computer Communications*, volume 29, numéro 13-14, p. 2521-33.
- [30] Ministère des transports du Canada (2006). Le coût de la congestion urbaine au Canada. Dans <http://www.adec-inc.ca/pdf/02-rapport/cong-canada-fra.pdf> (page consultée le 12/11 2009).
- [31] Mohammad Ilyas et Imad Mahgoub (2005). Handbook of sensor networks compact wireless and wired sensing systems. CRS Press LLS, USA, 775 p.
- [32] NXP Laboratories (2010). Data Sheet: JN5148-001-Myy . Dans http://www.jennic.com/files/support_files/JN-DS-JN5148MO-1v4.pdf (page consultée le 12/19 2010).
- [33] OwnerIQ, I. (2011). Panasonic Camera-Recorder Operating Instructions AG-DVC20P. Dans <http://camera.manualsonline.com/manuals/mfg/panasonic/agdvc20p.html> (page consultée le 02/11 2011).

- [34] Philips Semiconductors (2000). Electronic Compass Design using KMZ51 and KMZ52. Dans 21st Century Wireless Vehicle Detection. <http://ve6sbs.sbszoo.com/projects/compass/kmz52an00022.pdf> (page consultée le 10/22 2010).
- [35] Philips Semiconductors (2000). KMZ52 Magnetic Field Sensor. Dans http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/KMZ52_1.pdf (page consultée le 10/17 2010).
- [36] Polastre, J., Szewczyk, R. et Culler, D. (2005). Telos: Enabling ultra-low power wireless research. Dans 4th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, IPSN 2005, April 25, 2005 - April 27, volume 2005. Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, Los Angeles, CA, United states, p. 364-369.
- [37] Pottie, G. J. et Kaiser, W. J. (2000). Wireless integrated network sensors. *Communications of the ACM*, volume 43, numéro 5, p. 51-58.
- [38] Raghunathan, V., Schurgers, C., Park, S. et Srivastava, M. B. (2002). Energy-aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, volume 19, numéro 2, p. 40-50.
- [39] Saba, H., Mohammadmajid, H., Glitho, R., Ferhat, et K (2010). Integrating Wireless Sensor Networks and Mobile Ad hoc Networks for an Enhanced End-User Experience. ITU-T Kaleidoscope, Pune, India.
- [40] Salvadori, F., de Campos, M., Sausen, P. S., de Camargo, R. F., Gehrke, C., Rech, C., Spohn, M. A. et Oliveira, A. C. (2009). Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, volume 58, numéro 9, p. 3104-11.
- [41] Sang, H. L., Lee, S., Song, H. et Hwang, S. L. (2009). Wireless sensor network design for tactical military applications: remote large-scale environments. Dans MILCOM 2009 - 2009 IEEE Military Communications Conference. IEEE, Piscataway, NJ, USA, p. 7.
- [42] Savvides, A., Han, C. -. et Srivastava, M. B. (2001). Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. Dans 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, July 16, 2001 - July 21. Association for Computing Machinery, Rome, Italy, p. 166-179.
- [43] Sensys networks (2008). Wireless Vehicle Detection. Dans www.sensysnetworks.com/freewaysuccessstories (page consultée le 03/28 2010).
- [44] Shih, E., Cho, S. -, Ickes, N., Min, R., Sinha, A., Wang, A. et Chandrakasan, A. (2001). Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks. Dans 7th Annual International Conference on Mobile Computing and

Networking, July 16, 2001 - July 21. Association for Computing Machinery, Rome, Italy, p. 272-286.

- [45] Sipouo Ngandjon, M., Cherkaoui, S. (2011). On using compressive sensing for vehicular traffic detection. Dans 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), July 4, 2011 – July 8. IEEE, Istanbul, Turquie, P. 1182-1187
- [46] Siuli Roy, A. D. et Bandyopadhyay, S. (2008). Agro-sense: Precision agriculture using sensor-based wireless mesh networks. Dans 1st ITU-T Kaleidoscope Academic Conference, Innovations in NGN, K-INGN, May 12, 2008 - May 13. Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, Geneva, Switzerland.
- [47] Swaine, M. (2003). Smart Dust and Gray Goo. Dr.Dobb's Journal, volume 28, numéro 12, p. 66-68.
- [48] Techno-science (2009). Réseau de capteurs sans fil. Dans <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=11711> (page consultée le 02/19 2010).
- [49] Vincent L.C. et Cyril NGUYEN VAN PHU (2008). Applications des réseaux de capteurs intelligents et de la communication sans fil à l'instrumentation des structures de génie civil. Dans <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/37/67/74/PDF/doc00001674.pdf> (page consultée le 09/08 2010).
- [50] Xu, Y., Heidemann, J. et Estrin, D. (2001). Geography-informed energy conservation for ad hoc routing. Dans 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, July 16, 2001 - July 21. Association for Computing Machinery, Rome, Italy, p. 70-84.