

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المديرية العامة للبحث العلمي و التطوير التكنولوجي

Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique



Projet national de recherche : rapport final

RÉSEAUX DE CAPTEURS SANS FIL POUR SURVEILLANCE ET GESTION EN TEMPS RÉEL DU TRAFIC ROUTIER

Chef de projet : DJENOURI Djamel

Affiliation : Division théories et ingénierie des systèmes informatiques

Organisme de domiciliation : CERIST

Organisme pilote : CERIST

Programme national de Recherche : 2011-2013



RAPPORT INTERNE

Réseaux de Capteurs Sans Fil pour Surveillance et Gestion en temps Réel du Trafic Routier

Djamel DJENOURI : Chef de Projet

Messaoud DOUDOU, Mohamed Amine KAFI: Membres

Salem SALHI: Membre externe, Ministère du Transport

En partenariat avec : Le ministère du transport, et BETUR/EMA représenté par
Mr Azzedine BEKDOUCHE.

Octobre 2013

03 Rue des Frères Aissou – Ben Aknoun – ALGER – ALGERIE

Tél. : 021 91 62 05 à 08 – Fax : 021 91 21 26

Http : [//www.cerist.dz](http://www.cerist.dz)

..

Djamel DJENOURI, Messaoud DOUDOU, Mohamed Amine KAFI, Salem SALHI

Réseaux de Capteurs Sans Fil pour Surveillance et Gestion En temps Réel du Trafic Routier

Identificateur du rapport

CERIST

Résumé: Le nombre de véhicules en Algérie ne cesse d'augmenter ces dernières années, conduisant ainsi à une saturation du réseau routier. Cette saturation représente la cause principale d'encombrement, d'accidents, et de pollution. Ces problèmes ont des conséquences majeures sur l'économie du pays et la vie quotidienne du citoyen. Une solution possible à ce problème consiste à gérer d'une manière efficace le trafic routier, en se basant sur une surveillance en temps réel du trafic qui permettra d'avoir une vision instantanée sur la situation de nos routes. Un simple exemple est une intersection, où la gestion de feux de signalisations peut être beaucoup plus efficace en connaissant le nombre exacte de véhicules sur chaque segment de route (branche) à tout moment; Ainsi, la durée de feux verts peut être adaptée selon le nombre de véhicules en attente. Donner plus de priorité aux segments de routes (branche d'un carrefour) surchargés permettra d'équilibrer la charge de trafic sur les routes. Un autre exemple est la détection d'un accident ou d'arrêt brusque de véhicules dans une autoroute. Ainsi, informer les véhicules s'approchant de la région en question permettra d'éviter de graves accidents potentiels, et même d'orienter les véhicules vers d'autres routes si cela est possible. Ou encore, détecter la violation de la vitesse limite autorisée dans une autoroute, etc. Un réseau de micro capteurs sans fil, où les capteurs sont programmables et dotés de capacités de calcul, stockage, communication, peut être un outil efficace pour assurer la surveillance du trafic en temps réel. Ce projet a pour objectif de développer des solutions prototypes en ce sens, notamment le comptage à temps réel du trafic routier.

Mots clés: Intelligent Traffic System, Wireless Sensor Networks, Magneto-resistor.

Table des matières

INTRODUCTION	5
1. ETAT DE L'ART	6
2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE DETECTION	11
2.1. Architecture générale d'un Système de Gestion du Trafic.....	11
2.2. Échantillonnage des données magnétiques	13
2.3. Filtrage numérique des données brutes	16
2.3.1. Présentation du rôle de filtrage	16
2.3.2. Définition et classification des filtres numériques.....	16
2.3.3. Choix des filtres numériques	18
2.4. Algorithme de calibrage du capteur magnétique	19
2.5. Algorithme de Détection des Véhicules	23
2.5.1. Calcul du seuil adaptatif	23
2.5.2. Les Oscillations d'une Signature Magnétique et Problématique	24
2.5.3. Définition des états du système de détection.....	26
2.5.4. Algorithme de détection par comptage des oscillations.....	26
2.5.5. Limitation de l'algorithme de détection par comptage des oscillations	31
2.6. Algorithme de Classification des Véhicules	32
2.6.1. Extraction de la signature magnétique	32
2.6.2. Transformation du vecteur de signature	33
2.6.3. Compression de l'amplitude de la signature	33
2.6.4. Algorithme de classification par Niveau d'Amplitude	33
3. EXPERIMENTATIONS ET TESTE DE PERFORMANCE.....	35
3.1. Les paramètres de l'expérimentation	36
3.1.1. Emplacement du capteur magnétique	36
3.1.2. Orientation de l'axe magnétique	37
3.1.3. Coefficients des filtres numériques (α , β)	38
3.1.4. Le paramètre (Δ) du Seuil de détection	38
3.2. Fiabilité de l'algorithme de calibrage.....	40
3.2.1. Optimisation du temps de calibrage.....	41
3.3. Fiabilité de l'algorithme de détection	42
3.4. Tests de l'algorithme de classification	45
3.4.1. Transformation de la signature en vecteur de moyennes.....	45
3.4.2. Compression de la signature magnétique	46
3.4.3. Fiabilité de l'algorithme de classification	47
CONCLUSION	49
Références	50

Contexte du Projet

Ce rapport porte sur un projet national de recherche (PNR) financé par la Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique (DGRSDT) du ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique, effectué au sein de la division théorie et ingénierie des systèmes informatiques (DTISI). Le projet a été effectué en partenariat avec le ministère du transport, et BTUR/EMA(bureau d'étude des transports Urbains, entreprise métro d'Alger).

Remercîment

Les membres du projet tiennent à remercier:

- La DGRSCT pour le financement du projet
- Le ministère du transport, en particulier la direction du transport de la wilaya d'Alger pour les facilitations et les autorisations accordées pour effectuer des tests à la wilaya d'Alger
- BTUR, en particulier Mr Azzedine Bekdouche. notre partenaire économique et Mr Tadjpour les facilitations durant nos tests à Constantine.

INTRODUCTION

Les récentes avancées dans les domaines des technologies de la communication sans-fil et de la microélectronique ont permis le développement des composants miniaturisés appelés micro-capteurs qui sont utilisés pour surveiller divers phénomènes physiques dans l'environnement. L'évolution des supports de communication sans fil à faible consommation d'énergie, l'élargissement de la gamme des types de capteurs disponibles (thermiques, optiques, acoustiques, magnétiques, etc.) et la diminution de leur coût ainsi que leur taille ont élargi les champs d'application des réseaux sans fils pour voir naître les réseaux de capteurs sans fil. Un réseau de capteurs sans fil, en anglais *Wireless Sensor Network (WSN)*, est composé d'un nombre souvent très important de nœuds capteurs capables de fonctionner de manière autonome et s'auto-configurer en réseau sans qu'il y ait besoin d'interventions humaines. Ils disposent de leurs propres unités de calcul et sont alimentés par des sources d'énergie limitées (batteries). Ils peuvent être soit posés à un endroit précis soit dispersés aléatoirement en vue de surveiller à distance et de traiter des données dans des environnements complexes permettant l'émergence de nouveaux genres d'applications qui étaient peu envisageables auparavant. Cette technologie est en plein essor et fait partie d'un tournant dans le monde des réseaux sans fil. Elle apporte de nombreuses solutions en matière de détection et de traitement dans plusieurs domaines militaire, industriel, médical ou encore civile où on retrouve leur intégration dans diverses applications qui s'étalent de la simple tâche de prélèvement de la température jusqu'aux systèmes intelligents de prévention d'intrusions.

Le développement de l'économie des pays se base en grande partie sur les infrastructures routières et les réseaux d'autoroutes. L'Algérie n'échappe pas à cette règle et s'active d'ores et déjà dans ce sens pour à la fois renouveler ses réseaux existants et en construire de nouveaux. Or, ce développement n'est pas sans conséquence et engendre de nouveaux défis à résoudre comme par exemple les problèmes d'embouteillage et d'encombrements des routes qui n'ont pas cessé d'augmenter ces dernières années à cause notamment de l'augmentation du nombre de véhicules en circulation. Pour remédier à cela, il est nécessaire d'accompagner le développement des routes par la modernisation des techniques de surveillance routière utilisées et l'élaboration de nouvelles technologies permettant une gestion dynamique et en temps réel des flux de voitures qui y transitent.

L'objectif de ce travail est de concevoir puis réaliser un système de détection et de classification de véhicules en utilisant les capteurs magnétiques dans le cadre de la réalisation d'un projet national de gestion intelligente des intersections et du trafic routier en cours de recherche au sein du CERIST. Ce rapport est organisé comme suit : Section 1 présente un aperçu sur l'état de l'art sur les capteurs magnétiques ainsi qu'une présentation des différents travaux réalisés sur la surveillance du trafic en utilisant ses capteurs. La structure générale du système et le matériel utilisé va être détaillé dans la section 2. Tandis que dans les sections 3 et 4 vont être consacrées pour les algorithmes et les expérimentations réalisés pour chaque algorithme avec en détail les résultats obtenus. Enfin, le rapport se terminera par une conclusion avec de futures perspectives.

1. ETAT DE L'ART

Il existe plusieurs technologies de surveillance et de gestion du trafic routier qui peuvent être classées en trois catégories globales selon leur mode de fonctionnement et leur type d'installation. On retrouve les technologies embarquées aux véhicules, les technologies intrusives qui nécessitent une installation et une intervention sur la route à surveiller, et finalement les technologies dites non-intrusives qui regroupent plusieurs outils autonomes qui peuvent se mettre au bord des routes ou à l'intérieur des chaussées, sans nécessiter des travaux sur celles-ci. Ces outils peuvent être soit mobiles ou fixes.

Les technologies embarquées :

Ce sont un ensemble de systèmes informatiques embarqués sur les véhicules eux-mêmes et qui peuvent fonctionner en réseau sans nécessiter aucune intervention sur les routes à surveiller. Les deux technologies les plus connues de cette catégorie sont les systèmes satellitaires de navigation (GPS), et les systèmes basés sur les réseaux de téléphonie mobile.

Les technologies intrusives :

Les technologies intrusives sont les outils les plus utilisées dans le monde à nos jours pour la réalisation de systèmes de surveillance et de gestion du trafic routier. Elles sont dites intrusives car elles sont installées sous la chaussée des routes surveillées et nécessitent des interventions sur celles-ci ainsi que des maintenances régulières, ce qui constitue d'ailleurs leur inconvénient majeur. On peut citer pour cette catégorie:

- i) Les boucles inductives sont le plus couramment utilisées. Elles sont installées sous la chaussée et connectées à un oscillateur de courant externe. Elles possèdent une précision de détection très élevée. Cependant, leur coût d'installation élevé, ajouté à la perturbation de la circulation pendant les opérations de déploiement et de maintenance, représentent des inconvénients majeurs.
- ii) Un système de tubes pneumatiques utilise des tubes de pression allongés de façon perpendiculaire sur la route. Ceci permet de mesurer les paramètres du trafic ; Lorsqu'un véhicule passe dessus une impulsion de pression d'air est transférée le long du tube et une détection est signalée. Cette pression permet aussi de calculer la vitesse et même de classer les véhicules selon leur poids. Parmi ses inconvénients, citons l'usure de l'équipement et l'inexactitude des comptages des autobus et les camions.

Les technologies non-intrusives

Les technologies non intrusives utilisent des capteurs pour la détection de véhicules sans nécessiter une intervention sur les chaussées des routes pour les installer. Elles peuvent être installées sur le bord ou en dessous de la route sans perturber la circulation des véhicules. Des exemples de ce type de technologie incluent les systèmes de surveillance vidéo, les radars à micro-ondes, les capteurs à infrarouge, les capteurs acoustiques, et enfin les capteurs magnétiques qui vont être utilisés dans notre projet. Une vue présentée détaillée sur ce type sera donnée dans la section qui suit.

Les capteurs magnétiques:

Les capteurs magnétiques, également appelés magnétomètres à effet magnéto-résistif, permettent de surveiller le champ magnétique de l'environnement et détecter les

perturbations qui peuvent y survenir. Le champ magnétique de la terre est connu d'être sensible aux perturbations causées par les objets métalliques, tel que les véhicules qui traversent la zone de captage des magnétomètres.

Les capteurs AMR (Anisotropic MagnetoResistive) sont capables de détecter des champs magnétiques et sont optimisés pour une utilisation dans le champ magnétique de la terre. Un capteur AMR comprend un film mince de permalloy déposé sur une tranche de silicium en tant que bande résistive. En présence d'un champ magnétique, la résistance de cette bande résistive change de 2-3%. Le champ magnétique est détecté en utilisant quatre de ces bandes résistives pour former un pont de Wheatstone (voir *figure 1.1*). Ceci permet la mesure de la direction et l'amplitude du champ magnétique.

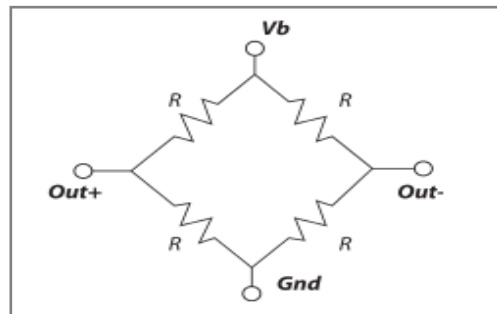


Figure 1.1 : Pont de Wheatstone [11]

Phénomène de perturbation du champ magnétique de la terre

Notre planète est entourée d'un gigantesque champ magnétique qui relie ses deux pôles terrestres nord et sud et qui couvre toute sa surface (*figure 1.2*). Ce champ est caractérisé par une faible puissance magnétique (égale à 5 mGauss) et une stabilité sur une échelle de plusieurs kilomètres carrés, mais il est également caractérisé par sa sensibilité et sa déformation dans les endroits où il y a présence d'aimants ou d'objets à forte densité métallique.

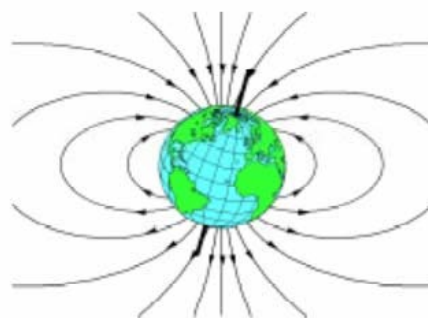


Figure 1.2 : Représentation du champ magnétique de la terre [12]

C'est cette déformation dans le champ magnétique terrestre qui peut être prélevée par des capteurs magnétiques, pour ensuite être utilisée dans la réalisation de divers applications de surveillance et de monitoring, comme notre système de détection de véhicules. La *figure 1.3* montre cette caractéristique de déformation du champ magnétique de la terre.

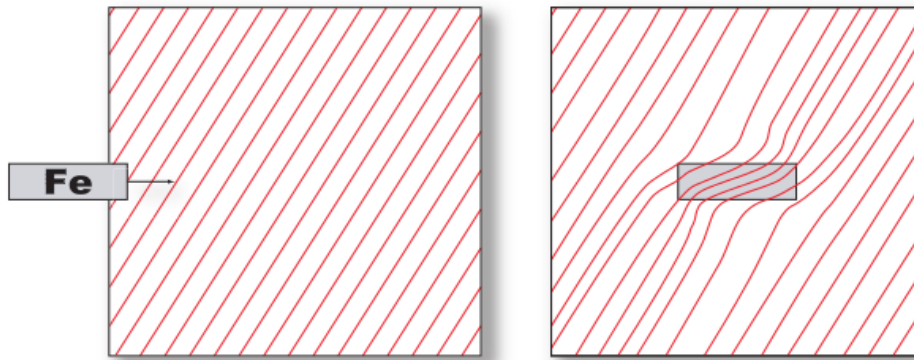


Figure 1.3 : Déformation du champ magnétique terrestre avec un objet métallique [12]

Les véhicules sont fabriqués à la base en utilisant plusieurs composants métalliques (le moteur, le squelette métallique, les axes des roues, etc.) qui font qu'eux aussi peuvent perturber le champ magnétique terrestre rendant possible leur détection avec les capteurs AMR. Cette perturbation lors de passage d'un véhicule crée ce qu'on appelle une « *signature magnétique* ». La signature magnétique est donc l'ensemble des données magnétiques échantillonnées et enregistrées par le capteur pendant le temps de détection d'un véhicule. Les figures 1.4a, 1.4b, et 1.4c montrent les différentes signatures magnétiques générées par différents types de véhicules.

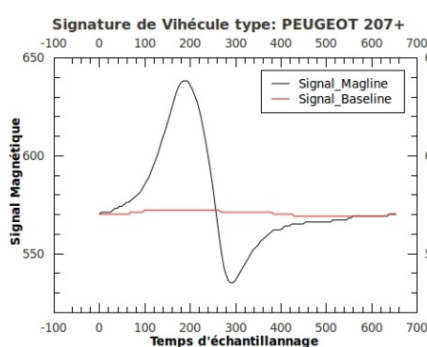


Figure 1.4a : Véhicule Léger

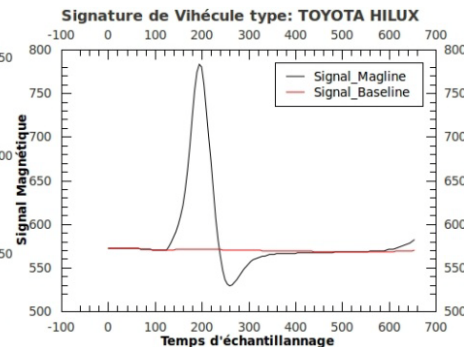


Figure 1.4b : Véhicule Utilitaire

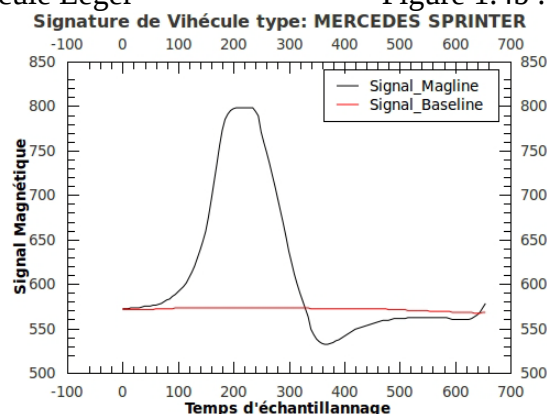


Figure 1.4c : Signature d'un Véhicule Lourd

Le capteur magnétique HMC1022 Honeywell est un capteur magnétique à deux axes conçu pour la détection de champ magnétique de la terre. C'est un capteur magnétique semi-conducteur très sensible conçu pour mesurer la direction et l'intensité du champ

magnétiques de la Terre, entre des dizaines de micro-gauss à 6 gauss. Les capteurs AMR HMC1022 utilisent des ponts résistives de Wheatstone pour mesurer le champ magnétique. Ils exigent seulement une tension d'alimentation pour la mesure. Une fois que le pont est alimenté par la tension d'alimentation, alors ces capteurs sont en mesure de convertir un champ magnétique incident dans les directions des axes sensibles à une sortie de tension différentielle. Les capteurs HMC1022 peuvent être utilisés pour des applications telles que les systèmes de navigation, et les magnétométries [4].

La tension de sortie est de 2,5 Volts HMC1022 à zéro gauss, et en fonction de la variation du flux magnétique la tension de sortie augmente ou baisse par rapport à cette marque. Comme le changement de tension de sortie est très faible, il est amplifié en utilisant un amplificateur opérationnel avec un gain électronique différentiel des entrées et, généralement, une seule sortie. Pour un gain de l'ordre de 100, nous obtenons une gamme complète d'échelle entre +6 à -6 gauss du HMC1022.

La sangle set/reset doit être utilisée périodiquement pour remettre en état les domaines magnétiques des éléments magnéto-résistifs [5]. Les raisons pour effectuer un set/reset sur un capteur AMR sont les suivantes:

- 1) Pour se remettre d'un champ magnétique externe solide qui a probablement remagnétisé le capteur
- 2) Afin d'optimiser les domaines magnétiques pour la performance la plus sensible.

Les champs magnétiques externes puissants qui dépassent 10 à 20 gauss n'endommagent pas de façon permanente les éléments de détection, mais ils perturbent les capteurs. Cette ré-aimantation des éléments capteurs se traduit par un manque de sensibilité. En utilisant les impulsions set/reset, le capteur est rétabli.

Ces dernières années, la littérature présente quelques travaux qui ont utilisé les capteurs magnétiques pour la détection des véhicules et la gestion du trafic. Dans [1], les auteurs présentent la conception d'un réseau de capteurs sans fil qui permet de repérer les espaces vacants dans un parking. Ce travail, utilise des capteurs sans fil (mica2) interfacés avec capteurs AMR (HMC1002) pour détecter les véhicules entrant et sortant sur le parking. Le système proposé fait appel à deux capteurs magnétiques, à l'entrée et à la sortie. En détectant les véhicules entrant et sortant, le système peut garder une trace du nombre de véhicules à l'intérieur du parking dans le but d'estimer le nombre de places vacantes. Dans chaque couloir intermédiaire, un capteur peut être placé à certains points de vue. Ces points pourraient être les détours de chaque voie et à mi-distance de chaque couloir. En comptant le nombre de voitures qui passent ces endroits, les places de stationnement utilisées et les places vides sont distinguées. Le système détecte les véhicules en quatre étapes:

- 1) Élimination du problème de la moyenne du signal magnétique du HMC1002 qui varie au fil du temps. Cela peut être dû à la dérive dans le champ magnétique de la terre, le bruit, ou la saturation en présence d'un champ magnétique continu. Pour cela, l'utilisation d'un filtre médian avec une taille de fenêtre de 500 échantillons pour corriger le signal d'entrée s'applique.

- 2) Élimination du bruit de quantification dans le magnétomètre, en éliminant les valeurs fluctuantes au sein d'un seuil de la valeur moyenne en les mettant à zéro.

- 3) La normalisation et la quantification, puisque la signature d'un véhicule dépend de plusieurs facteurs tels que la vitesse du véhicule, la distance et le matériel. Pour cela, le

signal est normalisé par l'observation des niveaux maximaux des pics positifs et négatifs. Une quantification personnalisée est utilisée par la suite pour quantifier le signal.

4) filtre adapté, cela se fait en utilisant la moyenne des largeurs des signaux quantifiés.

Les auteurs de [2] utilisent un réseau maillé sans fil pour construire un système de suivi des véhicules qui peuvent compter les trajectoires de déplacement du véhicule dans une intersection. Leur nœud sans fil se compose d'un capteur AMR pour la détection des véhicules, un module de communication radio PAN4570, et une batterie rechargeable lithium-ion. Ces nœuds sont placés au centre de voies de circulation à proximité des intersections. Un véhicule est détecté quand il se déplace à côté d'un nœud sans fil. Cet événement de détection est daté et enregistré par le nœud et envoyé au coordinateur. Le coordinateur enregistre ces détections de véhicules par chaque nœud. Un algorithme de suivi de véhicule est ensuite utilisé pour suivre les trajectoires des véhicules par l'intersection de ces données enregistrées. Le système gère également le nombre total de véhicules de l'intersection.

[2] utilise la méthode des moyennes mobiles simples pour faire face à la dérive des « niveaux statiques ». Dans un champ magnétique uniforme, un capteur AMR a un niveau statique ou lectures de base. Ce « niveau statique », cependant, se transforme progressivement en quelques millivolts même si le capteur est maintenu immobile. Comme les auteurs utilisent un système de détection à base de seuillage, cette dérive du niveau de base peut conduire à de fausses détections. Pour faire face à ce problème, une moyenne mobile simple (SMA) est employée pour le "niveau statique". Une fenêtre de dix échantillons précédents est conservée. Sa moyenne est considérée comme le niveau de base. Chaque seconde, l'échantillon le plus ancien est supprimé de cette fenêtre et le nouvel échantillon est ajouté. De cette manière, le niveau de base est recalculé à chaque seconde. Quand un véhicule est détecté, le niveau de base du capteur AMR va changer. Ce changement dans le niveau statique dû à une détection de véhicule ne doit pas faire partie de la SMA. Pour ce faire, le SMA doit être désactivé au cours de la période de détection de véhicule. Le capteur AMR est également échantillonné à 100 Hz. Si aucune valeur de cet échantillon à 100 Hz n'est supérieure au seuil, la valeur de SMA suivante sera ignorée jusqu'à ce que la tension de sortie du capteur AMR retombe en dessous du seuil. Aussi, pour augmenter la sensibilité du capteur AMR, sa position sur le PCB (Printed Circuit Board) a été modifiée. Initialement, elle repose à plat sur le PCB. Au lieu de cela, le HMC1001 a été positionné pour s'étendre verticalement au-dessus du PCB. Ceci accroît sa sensibilité en exposant l'ensemble de capteurs de champ magnétique de la terre. La conception de notre propre PCB intègre également cette fonction pour augmenter la sensibilité de notre capteur magnétique.

Les auteurs de [3] présentent un système qui peut compter le nombre de véhicules ainsi que d'estimer leur vitesse et leur longueur au niveau des autoroutes et des intersections. Ce système se compose d'un groupe de nœuds. Chaque nœud est composé d'un capteur magnétique HMC1051Z couplée à un nœud capteur sans fil MICA2DOT. Cette configuration est alimentée par une batterie au lithium. Ces nœuds communiquent les informations de trafic par ondes radios à un point d'accès qui les relaie à un centre de gestion du trafic. Les auteurs rapportent une précision de détection de 97% pour un jeu de test de 333 véhicules en utilisant leur algorithme de

détection basé sur le seuil. L'axe Z (l'axe vertical perpendiculaire au plan de la route) est utilisé pour la détection du véhicule, vu qu'il est plus localisé et le que le signal à partir des voies adjacentes peut être négligé. Un protocole d'accès au canal en minimisant la consommation d'énergie et le délai est aussi proposé et testé, permettant ainsi d'augmenter la durée de vie du système jusqu'à plusieurs années.

Dans [6], les auteurs soulèvent le problème des conditions routières variées, le trafic non structuré, le manque de discipline des voies et les différents types de véhicules. L'objectif du système est de faire une analyse de la circulation globale approximative et d'estimer le modèle de trafic plutôt que le comptage de véhicules (détecter les véhicules individuels). Ceci est effectué en utilisant des capteurs magnétiques placés sur le trottoir. Les auteurs ont choisis les capteurs AMR (HMC1022) pour détecter les véhicules dans leur proximité. Ils l'ont interfacé avec un nœud capteurs sans fil TelosB pour former l'unité de détection et la placer sur le côté du trottoir. Ils essaient d'estimer le modèle de trafic réel en traitant le signal reçu par ces capteurs. Cela est difficile, car le signal reçu par le capteur est essentiellement sous forme d'onde "mixte" de divers véhicules se déplaçant à différentes distances et vitesses. Ils essaient de faire une corrélation entre le signal du capteur et les caractéristiques de trafic telles que son état (en mouvement, arrêté ou en démarrage) et la densité (lourd, moyen ou rares).

L'analyse des résultats des données de capteurs magnétiques enregistrées montre que la vitesse des véhicules affecte non seulement la largeur de sa signature, mais aussi sa déviation maximale de la lecture de base. L'espacement entre les véhicules affecte gravement le signal détecté par les magnétomètres. Pour faire la distinction entre les modèles de trafic fixe et mobile, les caractéristiques des courbes de capteur magnétique tel que l'amplitude, la fréquence et la forme d'onde sont utilisées pour estimer l'état réel du trafic sur la route.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME DE DETECTION

2.1. Architecture générale d'un Système de Gestion du Trafic

Le système de gestion du trafic est composé d'un certain nombre de nœuds capteurs appelés « capteurs magnétiques » installés au milieu ou au bord de la route. Ces capteurs sont chargés des tâches de détection et de classification des véhicules et de la communication des événements enregistrés localement à un nœud appelé « station de base », ou *sink*, par le biais de leur interface radio sans fil. Des « nœuds relais » sont également utilisés pour maintenir la communication entre les capteurs magnétiques et leur station de base, et pour étendre le réseau quand cela est nécessaire. La station de base a comme rôle de récolter tous les messages qu'elle reçoit et de les acheminer, via un réseau filaire ou sans fil, vers un « serveur central » auquel elle est connectée. Ce dernier est connecté à plusieurs réseaux de capteurs similaires et sert de machine de base pour la sauvegarde et l'affichage des données reçues, l'analyse en temps réel et la gestion à distance de l'état du système. La figure 2.1 illustre le diagramme général d'un tel système de gestion.

Le sous système de détection qui sera principalement traité dans ce rapport est constitué de plusieurs modules à savoir :

- **Module d'échantillonnage** : son rôle est de récupérer le signal magnétique brut depuis le capteur avec une fréquence d'échantillonnage assez grande, pour ne pas perdre d'informations lors du passage de véhicules.
- **Module de calibrage**: dans ce module, nous allons expliquer en premier lieu l'algorithme de calibrage du capteur magnétique permettant de le ramener à ce qu'on appelle un état normal de détection. Il s'agit de faire sortir le capteur de l'état de Saturation dans lequel il se trouve automatiquement dès le démarrage et à chaque fois qu'il reçoit une très forte perturbation magnétique, pour le stabiliser dans un état neutre à partir duquel il devient sensible et fonctionnel.
- **Module de filtrage de données** : ce module fait des transformations numériques appliquées sur le signal brut afin de filtrer les bruits parasites et d'établir une ligne de base comme référence du champ magnétique ambiant de l'environnement où l'on se trouve

Autoroutes

Intersections

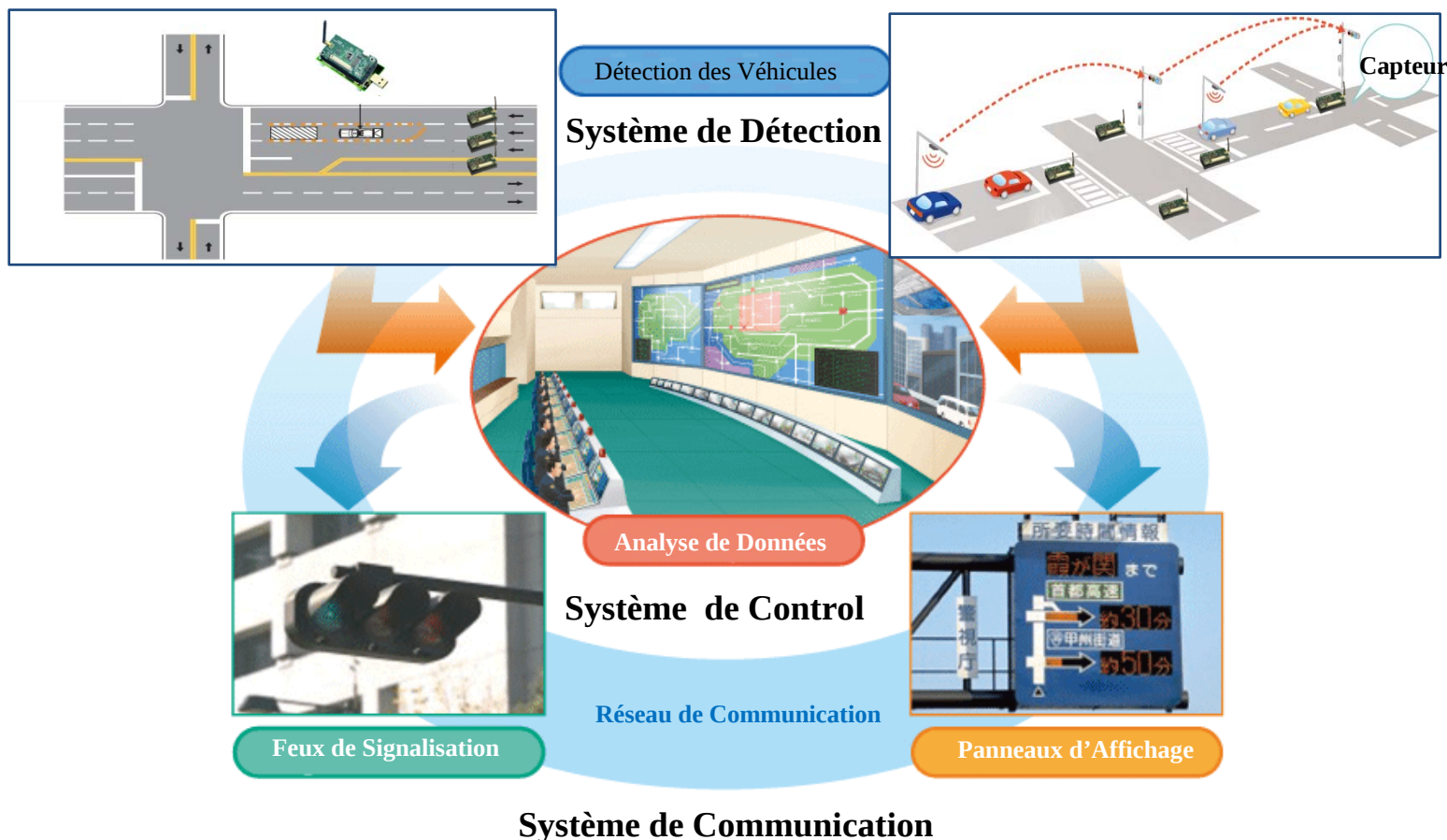


Figure 2.1 : Diagramme général du système de gestion du trafic

- **Module de détection** : Dans ce module, nous allons décrire un algorithme de détection de véhicules appelé « *Algorithme de Détection par Comptage des Oscillations Magnétique* » qui vise à soulever les défis posés

par le matériel. Des organigrammes et des automates seront également utilisés comme appui pour mieux expliquer son fonctionnement.

- **Module de classification** : pour ce module, nous avons implémenté un algorithme de classification des véhicules détectés dans des classes et des catégories de carrosseries différentes. Nous nous inspiré là d'algorithmes déjà développés pour des systèmes similaires de classification. En particulier, l'algorithme de classification dit « *Classification par comparaison directe de signatures magnétiques* » [7].

La *figure 2.2* montre le schéma logique des différents modules. En ce qui suit, nous allons détailler le fonctionnement de chaque module avec sa mise en œuvre réel.

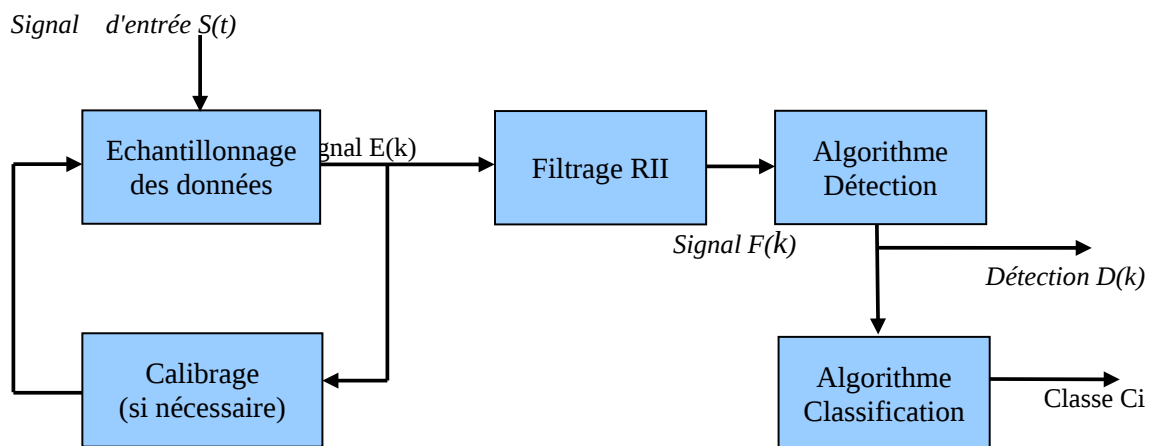


Figure 2.2 : Schéma logique des modules d'un système de détection

2.2. Échantillonnage des données magnétiques

Nous avons utilisé des nœuds capteurs (appelés *Motes* en anglais) de la famille *MicaZ* sur lesquels nous avons installé une carte de captage de type *MTS310* qui comporte plusieurs composants électroniques de captage dont le magnétomètre de type *HMC1002* à double axe magnétique qui représente le composant de captage (voir *figure 2.3*).

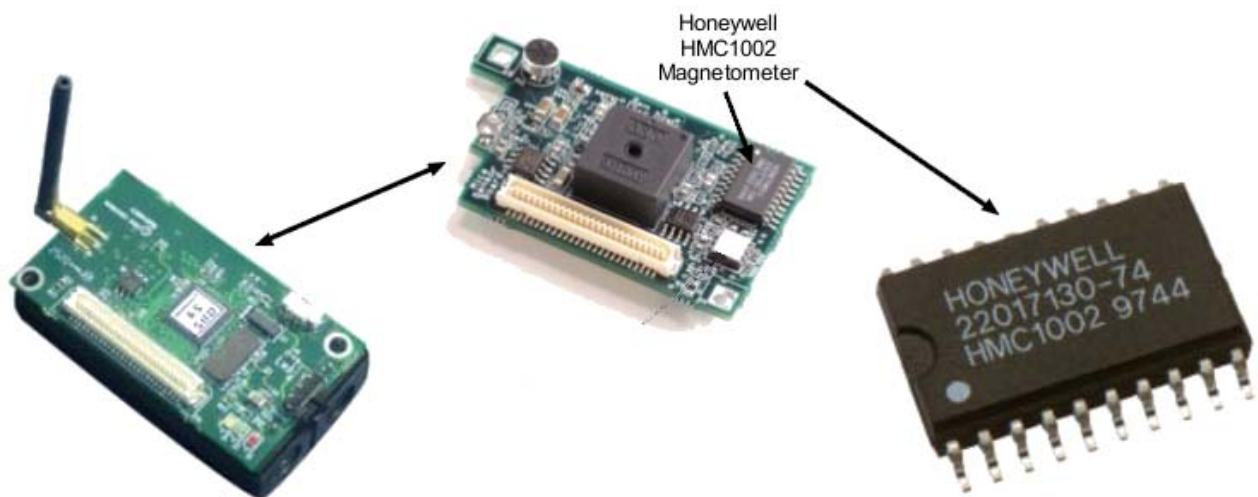


Figure 2.3 : MoteMicaZ, carte de captage MTS310 et magnétomètre HMC1002

Le magnétomètre HMC1002 que nous utilisons est composé de deux microcircuits à l'intérieur représentant deux axes magnétiques (X, Y), voir *figure 2.4*. Il offre la possibilité de capter en même temps deux champs magnétiques différents orientés dans deux directions perpendiculaires l'une par rapport à l'autre sur un plan à deux (2) dimensions. Notons par *MagX* le champ magnétique au long de l'axe X, et par *MagY* le champ magnétique au long de l'axe Y de ce plan. Dans notre cas, un seul champ magnétique récupéré dans une direction donnée est largement suffisant pour l'objet de notre détection.

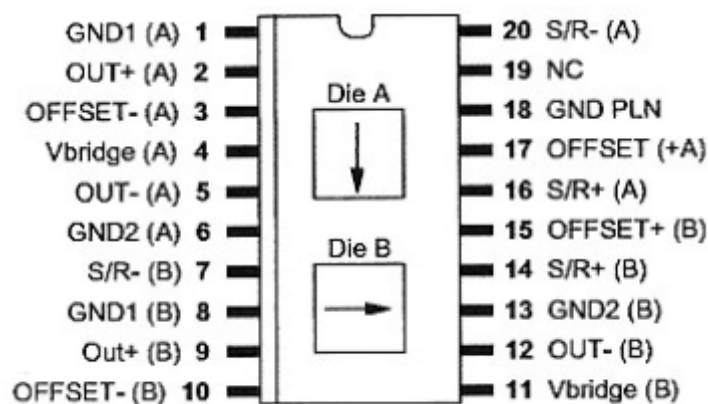


Figure 2.4 : Microcircuit à axe double du magnétomètre HMC1002 [4]

Pendant le captage du **signal magnétique à temps continu**, soit $S(t)$, grâce au composant HMC1002, le circuit intégré à la carte de captage MTS310 et celui intégré au capteur MicaZ font tous les prétraitements de filtrage analogique et de numérisation (échantillonnage et quantification) du signal analogique. Ces prétraitements sont nécessaires pour fournir en sortie un **signal numérique à temps discret** $E(k)$ sous forme d'une suite d'éléments binaires appelés échantillons brutes qui ont une valeur significative et qui sont exploitables par l'utilisateur final.

Ces valeurs numériques sont récupérées par le biais du *Convertisseur Analogique-Numérique* abrégé en CAN (« Analog to Digital Converter » ou ADC)

connecté au microcontrôleur du mote *MicaZ* et qui est caractérisé par un bus de données d'une résolution de *10 bits* correspondant à une valence (*nombres d'états*) de $2^{10} = 1024$ états possibles du signal de sortie. En réalité, le capteur magnétique se suffit d'exploiter seulement un sous intervalle des valeurs de sortie de l'ADC compris entre les valeurs ~ 200 et ~ 800 comme le montre la *figure 2.5* :

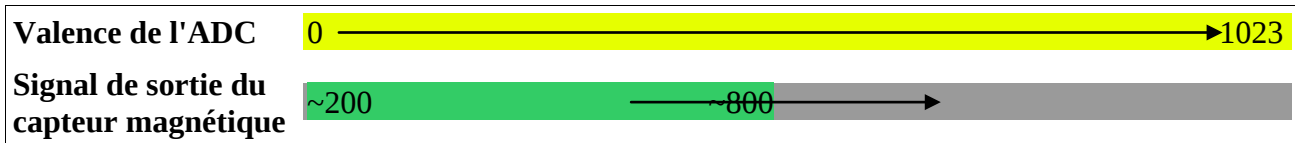


Figure 2.5 : Valeurs de sortie du signal magnétique

Toutes les valeurs numériques représentant le champ magnétique capté seront donc comprises dans cet intervalle $[\sim 200, \sim 800]$. Pour réaliser le processus de collecte de données au niveau applicatif, l'utilisateur n'a plus qu'à choisir la fréquence d'échantillonnage lui permettant de définir la cadence avec laquelle il veut prélever les échantillons du champ magnétique. Ceci en utilisant une simple commande de lecture fournie par l'interface logicielle du composant magnétique et lancée périodiquement par un ordonnanceur d'horloge (appelé *Timer*).

Échantillonner un signal consiste à prendre des échantillons de celui-ci à des instants régulièrement espacés. La période entre deux échantillons s'appelle **période d'échantillonnage** (notée T_e). Cette dernière permet de calculer la **fréquence d'échantillonnage** du signal (notée $F_e = 1/T_e$) qui reflète la quantité éventuelle d'informations récupérée depuis le signal analogique rendant possible l'interprétation numérique de celui-ci ainsi que sa transmission, sa transformation avec des traitements mathématiques, et éventuellement sa reconstitution sous sa forme analogique d'origine.

Lorsqu'on veut échantillonner un signal analogique $S(t)$ (voir *figure 2.6*), on doit essayer de choisir la plus grande fréquence d'échantillonnage possible pour éviter la perte d'informations. En même temps, il faut essayer de minimiser cette fréquence pour diminuer les informations redondantes ou inutiles, et tenir compte des contraintes de mémoire, de puissance de calcul, et de consommation d'énergie du capteur en question.

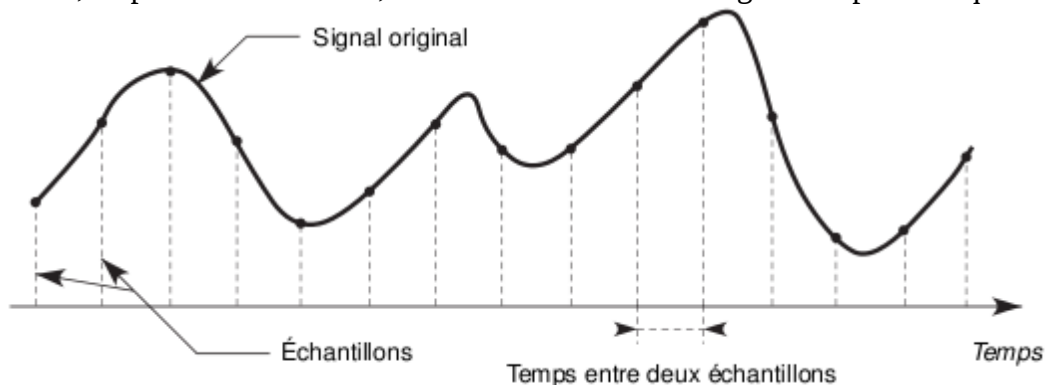


Figure 2.6 : Échantillonnage d'un signal analogique [8]

Dans ce contexte, le **théorème d'échantillonnage de Shannon-Nyquist** dit que si un signal $S(t)$ est échantillonné à intervalle régulier dans le temps et à un taux supérieur au double de la fréquence significative la plus haute, les échantillons $E(k)$ contiennent

toutes les informations du signal original. En particulier, la fonction $S(t)$ peut être reconstituée à partir des échantillons [8].

On a donc choisit, pour la collecte de données dans notre cas et comme montré dans la *figure 2.7*, une fréquence d'échantillonnage $F_e = 100\text{Hz}$ (100 échantillons/seconde) pour le signal magnétique, ce qui correspond à une période de lecture de 10ms pour chaque échantillon. Ce choix permet de ne pas perdre d'informations utiles et donc ne pas rater des détections potentielles de véhicules même si ces derniers voyagent à vitesse très élevée devant notre capteur (allant en théorie jusqu'à 150Km/h).

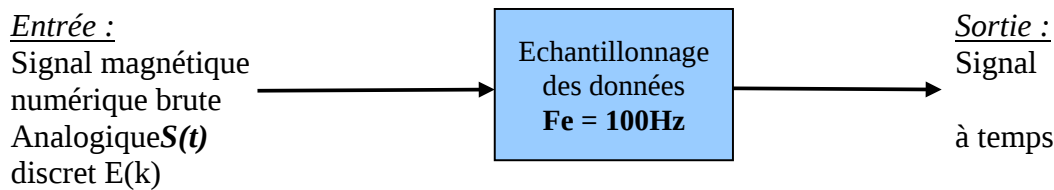


Figure 2.7 : Composant d'échantillonnage du signal magnétique

2.3. Filtrage numérique des données brutes

2.3.1. Présentation du rôle de filtrage

Le filtrage est une étape très importante dans notre chaîne d'acquisition de données. Il permet de tirer l'essentiel et le nécessaire des informations contenues dans un signal brute d'entrée sur lesquels se basent tous les traitements algorithmiques de détection et de classification de véhicules. Une fois le signal magnétique capté, il passe par des composants électroniques à l'intérieur du magnétomètre (résistances, condensateurs, transistors ou autres circuits intégrés), pour subir un premier **filtrage analogique** qui permet de normaliser le signal d'entrée et de donner en sortie un **signal analogique continu dans le temps $S(t)$** . Ce dernier est échantillonné, comme expliqué précédemment, puis numérisé par le convertisseur analogique-numérique pour donner cette fois un **signal numérique brute $E(k)$** sous forme d'une suite d'échantillons représentant chacun l'estimation numérique de la valeur analogique de départ. Ces échantillons seront ensuite remis à l'application par le biais du registre de données du microcontrôleur. Le signal numérique $E(k)$ à l'état brute doit encore être filtré au niveau applicatif en lui appliquant ce qu'on appelle un **filtrage numérique** grâce à un ensemble de transformations et de calculs mathématiques pour lisser le signal en question et filtrer encore une fois les bruits parasites de hautes fréquences. Cette étape donnera lieu à un **signal numérique filtré $F(k)$** représentant les informations utiles et nécessaire pour décrire le champ magnétique réel de l'environnement surveillé.

2.3.2. Définition et classification des filtres numériques

Un filtre numérique est défini mathématiquement comme un opérateur ou une transformation qui modifie une séquence d'entrée, $E(k)$, en une séquence de sortie, $F(k)$. On peut représenter cette transformation par un opérateur, soit T , tel que : $F(k) = TE(k)$. Ceci en donner l'équation mathématique, ou son schéma fonctionnel [9]. Il existe deux types de filtres numériques qui sont :

Filtres à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) : ce type de filtre est dit fini car sa réponse impulsionnelle se stabilisera ultimement à zéro. Il est aussi appelé filtre non récursif car sa sortie dépend uniquement de l'entrée du signal sans aucune contre-réaction. Un exemple simple de sommation d'une série de N données puis le calcul de leur moyenne est équivalent à appliquer un filtre RIF à coefficient constant, $1/N$, à ces données. Ce type de filtre correspond à un échantillon de sortie, $F(k)$, qui dépend uniquement des échantillons d'entrées $E(k)$, $E(k-1)$, $E(k-2)$, ... $E(k-N)$. Il est toujours stable (par construction), et sa forme générale d'ordre N est décrite par l'équation suivante:

$$F(k) = \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N E(k-n) \quad (2.1)$$

- a) **Filtres à Réponse Impulsionnelle Infinie (RII) :** ce type de filtre est dit infini car sa réponse impulsionnelle est une valeur oscillatoire qui prend beaucoup de temps pour se stabiliser, et parfois, elle ne se stabilisera jamais. Il est aussi appelé filtre récursif car sa sortie dépend à la fois du signal d'entrée et du signal de sortie. Il possède ainsi une boucle de contre-réaction. Il correspond par cela à une structure bouclée où l'échantillon de sortie, $F(k)$, dépend non seulement des échantillons d'entrées $E(k)$, $E(k-1)$, $E(k-2)$, ... $E(k-N)$, mais aussi des sorties précédentes $F(k-1)$, $F(k-2)$, ... $F(k-M)$. Il y a donc une réinjection de la sortie vers l'entrée, comme le montre la forme générale d'ordre (N,M) décrite par l'équation suivante :

$$F(k) = \alpha \left(\frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N E(k-n) \right) + \beta \left(\frac{1}{M} \sum_{m=0}^M F(k-m) \right) \\ \text{avec } 0 < \alpha \leq 1 \text{ et } \beta = 1 - \alpha \quad (2.2)$$

La valeur des coefficients α et β fixera la nature du filtre RII. Le filtre dit **passé-bas** qui filtre les composantes hautes fréquences et récupère les composantes basses fréquences, ou le filtre **passé-haut** qui filtre les composantes basses fréquences et récupère les composantes hautes fréquences. Le tableau 2.1 présente un résumé des caractéristiques des filtres précédents, RIF et RII :

Caractéristiques	Filtre RIF	Filtre RII
Récurtivité	Non récursif	Récursif
Sélectivité	Faible	Élevée
Ordre	Élevé	Faible
Nombre d'opérations	Élevé	Faible
Mémoire nécessaire	Élevée	Faible
Stabilité	Absolue	Limitée
Précision des coefficients	Raisnable	Élevée
Filtres adaptatifs	Possible	Difficile

Tableau 2.1 : Tableau comparatif des caractéristiques des filtres RIF et RII [10]

2.3.3. Choix des filtres numériques

Vue les limitations des capteurs en termes de capacité de calcul et de stockage, le filtre utilisé doit être choisi en tenant compte de ses cout en termes de nombre d'opérations et en mémoire. D'après le tableau 2.1, nous optons pour un **filtre RII d'ordre (N, 1)** avec comme entrée un ensemble N d'échantillons brutes et une seule sortie réursive $F(k-1)$. Ce type de filtre permet de définir plusieurs filtres numériques en même temps sur le même signal brute d'entrée, en variant seulement les valeurs des coefficients α et β . On va d'abord calculer la moyenne de l'ensemble N des échantillons d'entrée puis cette moyenne sera pondérée par un premier coefficient α , tel que $0 < \alpha \leq 1$. Le résultat sera additionné avec la sortie précédente, $F(k-1)$, du filtre qui est-elle même multipliée par le deuxième coefficient β , avec $\beta = 1 - \alpha$, pour donner à la fin le filtre RII récuratif d'ordre (N,1) dont l'équation est la suivante :

$$F(k) = \alpha \left(\frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N E(k-n) \right) + \beta (F(k-1)) \quad (2.3)$$

Le schéma fonctionnel correspondant à notre filtre est représenté par la *figure 2.8* ci-dessous :

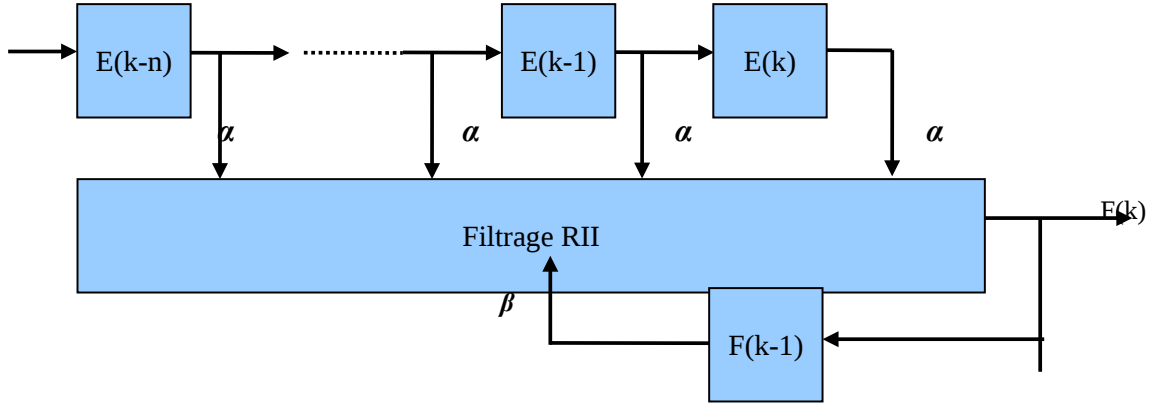


Figure 2.8 : Schéma fonctionnel du filtre RII

Pour concevoir l'algorithme de détection, nous avons besoin d'utiliser le filtre RII défini dans l'équation (2.3) pour calculer deux filtres numériques différents. Le premier filtre, nommé **Magline(k)**, va filtrer les bruits contenus dans le signal brut et représenter le champ magnétique réel de l'environnement surveillé, alors que le deuxième filtre, nommé **Baseline(k)**, va établir une ligne de base stable dans le temps qui représentera le champ magnétique ambiant de l'environnement :

$$Magline(k) = \alpha_1 \left(\frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N E(k-n) \right) + \beta_1 (Magline(k-1)) \quad (2.4)$$

et

$$Baseline(k) = \alpha_2 \left(\frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N E(k-n) \right) + \beta_2 (Baseline(k-1)) \quad (2.5)$$

On va choisir deux coefficients (α, β) différents pour les filtres **Magline(k)** et **Baseline(k)** tout en respectant la condition $\alpha_1 < \alpha_2$, et donc $\beta_1 < \beta_2$, pour obtenir le résultat escompté. Soit (α_1, β_1) , respectivement (α_2, β_2) , ces coefficients. Leurs valeurs numériques seront fixées après plusieurs tests de filtrage sur le signal magnétique réel pour choisir à la fin les valeurs qui donneront les résultats de filtrage attendus.

2.4. Algorithme de calibrage du capteur magnétique

Nous avons mentionné dans le module échantillonnage que les valeurs numériques de sortie de l'ADC représentant le champ magnétique capté par le magnétomètre HMC1002 sont contenues dans l'intervalle effectif [~ 200 , ~ 800], comme illustré par la figure 2.5. Cet intervalle définit la sensibilité de notre magnétomètre, et il peut être divisé en deux (2) grandes zones d'état physique du capteur :

- **Zone Sensible** représentée par l'intervalle des valeurs de sortie [~ 300 , ~ 700] dans laquelle le capteur réagit et détecte les perturbations magnétiques causées par les objets métalliques autour de lui.
- **Zone de Saturation** représentée par les intervalles [~ 200 , $300[$ U $]700$, $800]$, où le capteur perd sa sensibilité et devient saturé ou incapable de détecter les perturbations magnétiques autour de lui.

La figure 2.9 suivante schématise ces zones de sensibilité :

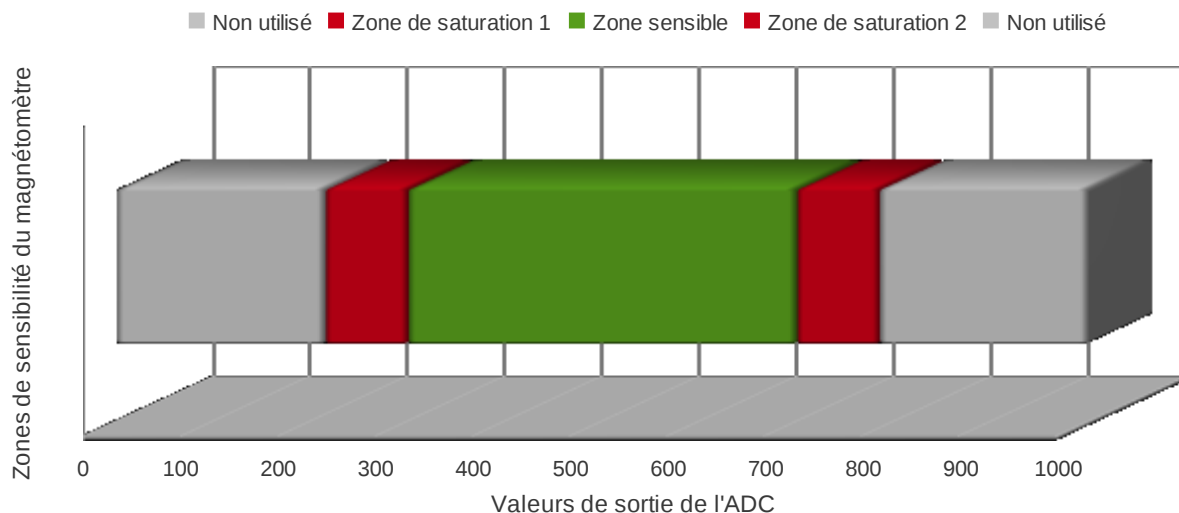


Figure 2.9 : Zones de sensibilité du magnétomètre HMC1002

Au démarrage du capteur, le magnétomètre se retrouve automatiquement dans la zone de saturation (zones rouges dans la figure 2.9). Pour pouvoir effectuer la détection, il doit se trouver dans la zone sensible (zone verte dans la figure 2.9) au moment où un véhicule passe à côté de lui. Il doit retourner et rester dans cette zone tant qu'il n'y a pas de perturbations magnétiques à détecter. Pour le ramener à cette zone, on a besoin d'effectuer une **opération de calibrage** sur le magnétomètre lui-même. Pour indiquer que le capteur est en zone de saturation, on peut utiliser la variable logique suivante :

$$Saturation(k) = \begin{cases} FAUX & \text{si } 300 \leq E(k) \leq 700 \\ VRAIX & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

Le calibrage est rendu possible grâce à un composant électronique appelé **potentiomètre** intégré au circuit électronique du capteur magnétique. Ce dernier permet de lui injecter de petites charges électriques afin de changer la magnétisation interne de son vecteur de charges pour l'aligner et orienter toutes ses charges dans le même sens comme montré

par la *figure 2.10*. Une fois le vecteur de magnétisation des charges aligné correctement, il peut pivoter suite aux perturbations magnétiques et fournir des mesures significatives à notre magnétomètre. On dit alors que le capteur sort de son état de saturation et devient sensible et fonctionnel.



Figure 2.10 : Magnétisation du vecteur de charges du magnétomètre [11]

C potentiomètre peut être contrôlé grâce à son interface logicielle fournie avec le fichier pilote (driver) du capteur. Cette interface fournit une **commande de calibrage** pour ajuster la sortie du magnétomètre en lui donnant en paramètre une valeur numérique au choix. Cette valeur est une variable entière sur 1 octet (8 bits) offrant 256 ajustements possibles (2^8).

Lors de la phase de calibrage, tout l'intervalle d'ajustement du potentiomètre sera parcouru à la recherche de la valeur qui réalise le calibrage et stabilise le magnétomètre en zone sensible. Une fois que cette dernière soit atteinte, on arrête l'algorithme de calibrage et on entre dans la phase de détection. Ce processus peut être résumé par les étapes suivantes:

1. Initialiser la variable d'ajustement à une valeur initiale, soit par exemple «0».
2. Injecter la variable grâce à la commande de calibrage du potentiomètre.
3. Incrémenter la variable d'ajustement.
4. Lire le prochain échantillon renvoyé par le magnétomètre.
5. Tester : Si zone sensible atteinte alors aller à l'étape (6), sinon aller à l'étape (2).
6. Calibrage terminé : zone sensible atteinte !

Nous avons remarqué suite à plusieurs tests de notre algorithme de calibrage que la valeur de la variable d'ajustement est dynamique peut changer d'une opération de calibrage à une autre. Ceci est dû aux caractéristiques physiques du capteur magnétique qui se voit influencé par le champ magnétique de la terre, par sa position géographique d'un endroit à un autre, et également par l'orientation de son axe magnétique par rapport au nord terrestre de la terre. Il est donc nécessaire de répéter l'opération de calibrage à chaque fois que le capteur devient saturé pour une des raisons suivantes :

- Quand le capteur est éteint puis rallumé, ou quand il démarre pour la première fois.
- Quand il est déplacé d'un endroit à un autre, ou quand quelqu'un intervient pour le pivoter et changer son orientation.
- Quand il subit une très forte perturbation magnétique, en magnitude et en temps d'exposition, venant d'un objet métallique ou d'un aimant qui causerait la démagnétisation du vecteur de charges et donc la saturation du magnétomètre.

En réalité, même si le capteur donne des lectures indiquant qu'il est en zone de saturation, il ne se bloque dans cette zone qu'après passage d'un bon moment. Ceci est estimé par les tests de saturation en utilisant un aimant à environ 10 secondes. Après expiration de cette période, un calibrage devient nécessaire. Une fois le processus de calibrage terminé, le capteur devient sensible et retourne des valeurs de sortie à réaction oscillatoire et symétrique à l'intérieur de la zone sensible. La réaction est de faible oscillation quand les perturbations magnétiques détectées sont légères, et de forte oscillation quand les perturbations magnétiques sont puissantes. Quand la magnitude des perturbations magnétiques est très élevée ou l'objet qui les cause est très proche du capteur, les valeurs de sortie de ce dernier peuvent atteindre les zones de saturation dans les deux extrémités de la zone sensible. Toutefois, et dès que l'objet ou le véhicule qui causait les perturbations du champ magnétique s'éloigne, le capteur reprend sa position initiale d'avant la détection. Ce comportement peut être assimilé à une boussole magnétique avec une aiguille qui indique le nord terrestre (voir la *figure 2.11*).

Lors du processus de calibrage, on doit non seulement calibrer le capteur sur la zone sensible [~300, ~700] mais on doit également essayer de rapprocher sa valeur de calibrage le plus possible au centre de cet intervalle (les valeurs autour de ~500) pour garantir la meilleure sensibilité possible du capteur. Cela nous ramène à définir une nouvelle zone à l'intérieur de la zone sensible, qui sera l'intervalle cible du calibrage, on va l'appeler la « **Zone Stable** » ou la zone de fonctionnement normal et dont l'intervalle sera défini sur [~450, ~550] (*figure 2.11*).

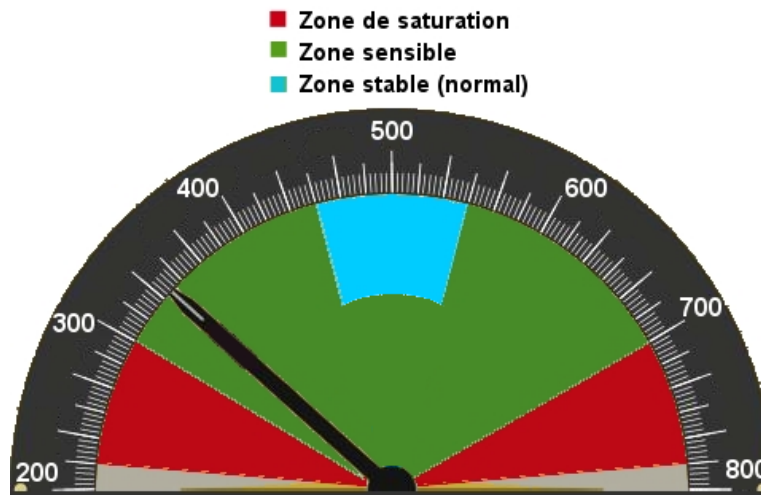


Figure 2.11 : Représentation graphique abstraite du magnétomètre physique

Le calibrage sera basé uniquement sur les valeurs magnétiques brutes. Pour savoir si la zone stable est atteinte, une variable logique sera utilisée. Elle définit par:

$$Stable(k) = \begin{cases} VRAIX & \text{si } 450 \leq E(k) \leq 550 \\ FAUX & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.7)$$

L'algorithme de calibrage proposé est donné par :

```

// Intervalle d'ajustement du potentiomètre : [0, 255]
Entrée :mag_val, adj_cpt : Entier;
Initialisation :
adj_cpt ← 0; // 0 : Première valeur de l'intervalle du potentiomètre

FonctionLireEchantillonSuivant()
    Lancer la commande de lecture magnétique;
    mag_val ← Récupérer valeur retournée par l'ADC;
    Si ((450 <= mag_val) ET (mag_val<= 550)) alors
        // Calibrage fini, zone stable atteinte !
        // Débuter le fonctionnement normal du capteur ...
    Sinon
        // Appeler la fonction de calibrage
        Appel Calibrage();
    Fin si
Fin fonction

FonctionCalibrage()
    // Appliquer la commande de calibrage
    AjusterPotentiometre(adj_cpt);

    adj_cpt++; // Incrémenter le compteur d'ajustement du potentiomètre

    Si (adj_cpt = 256) alors
        adj_cpt ← 0; // Réinitialiser le compteur s'il le faut
    Fin si
Fin fonction

```

La figure 2.12 résume le fonctionnement de l'algorithme de calibrage par un organigramme d'exécution.

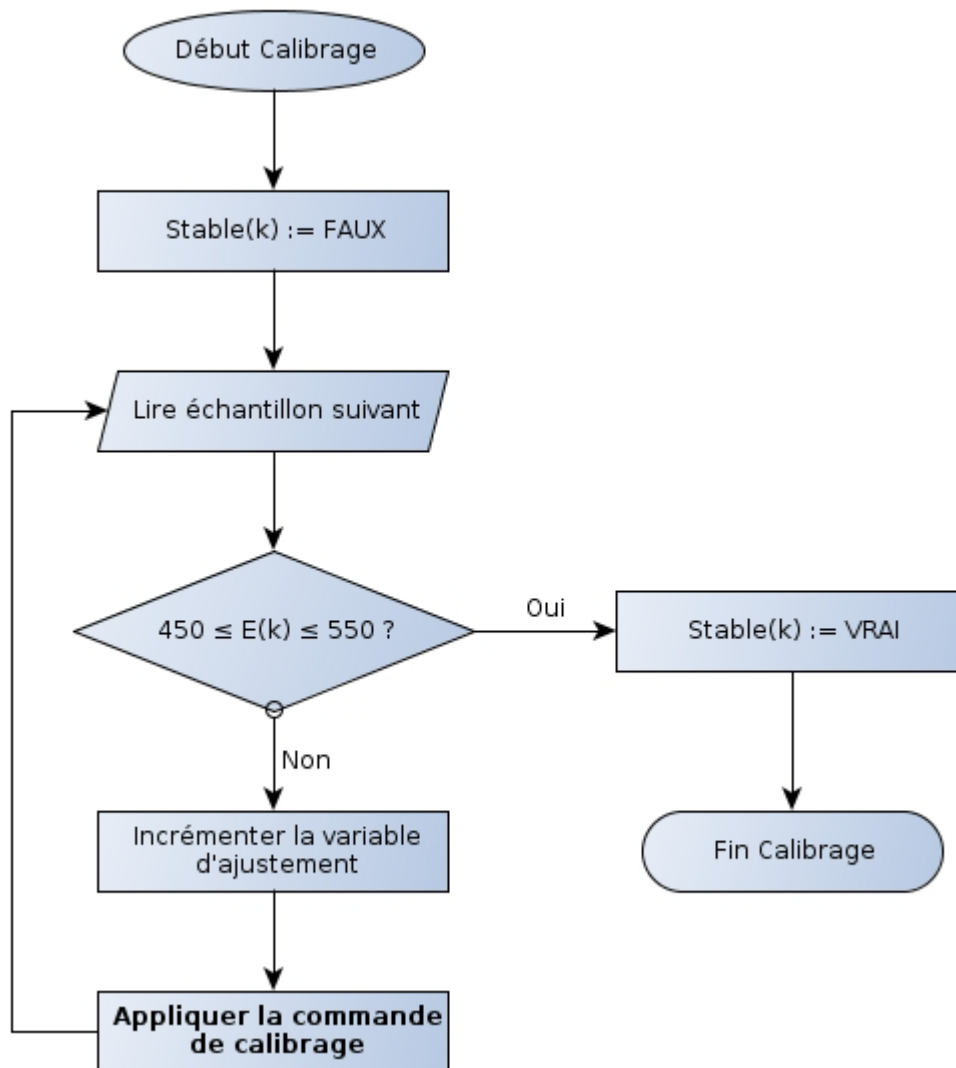


Figure 2.12 : Organigramme de l'algorithme de calibrage

2.5.Algorithme de Détectiondes Véhicules

2.5.1. Calcul du seuiladaptatif

Le seuil représente la valeur à partir de laquelle la différence minimale entre le signal de sortie des deux filtres précédents est considéré significative. Il permet de dire que les perturbations magnétiques détectées sont causées par un véhicule et non pas par un simple objet métallique qui fausserait la décision. Le seuil est dit adaptatif car il est calculé à partir du filtre magnétique ambiant, $Baseline(k)$, qui change et s'adapte constamment en fonction de l'environnement. Comme les perturbations magnétiques peuvent être oscillatoires dans un sens comme dans un autre, on doit calculer deux seuils de détection, un **seuil supérieur** et un **seuil inférieur**. Ces sont symétriques par rapport à la valeur du champ magnétique ambiant et définis comme suit :

$$SeuilSup(k) = Baseline(k) + \Delta \quad (2.8)$$

$$SeuilInf(k) = Baseline(k) - \Delta \quad (2.9)$$

La valeur Δ représente la **différence minimale** entre les deux champs pour permettre de faire une décision de détection d'un véhicule. C'est une constante paramétrable à définir lors de la phase des tests de l'algorithme de détection pour choisir la valeur adéquate permettant des décisions de détection fiables et justes.

2.5.2. Les Oscillations d'une Signature Magnétique et Problématique

Une signature magnétique d'un véhicule est composée généralement d'une oscillation ou plus (généralement deux oscillation). Une oscillation peut être positive ou négative. Elle est définie comme suit :

$$Osc^+(k): \quad Magline(k) \geq SeuilSup(k) \quad (2.10)$$

$$Osc^-(k): \quad Magline(k) \leq SeuilInf(k) \quad (2.11)$$

Nous avons étudié les signatures d'un nombre important de véhicules (échantillon de plus de 600 véhicules) où nous avons constaté que les signatures ne sont pas homogènes ; une signature peut se réduire en une seule oscillation positive (Fig. 2.13), en une seule oscillation négative (Fig. 2.14), en deux oscillations, une positive et une négative (Fig. 2.15, et Fig. 2.16), en deux oscillation positive (Fig. 2.17), ou encore deux oscillation négatives (Fig. 2.18). Enfin, elle peut même se former en trois oscillations comme montré sur la Fig. 2.19.

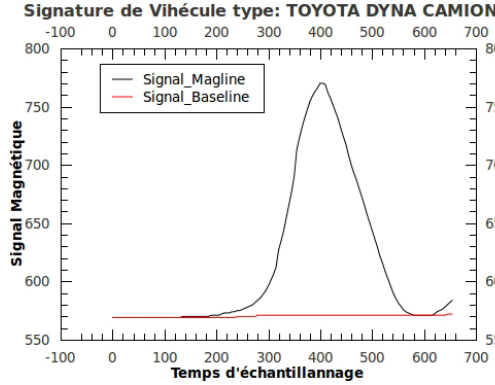


Figure 2.13 : 1 Osc⁺

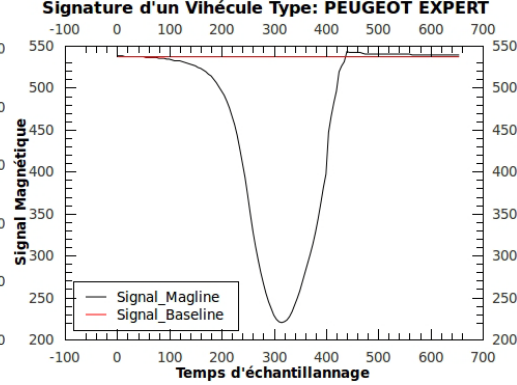


Figure 2.14 : Osc⁻

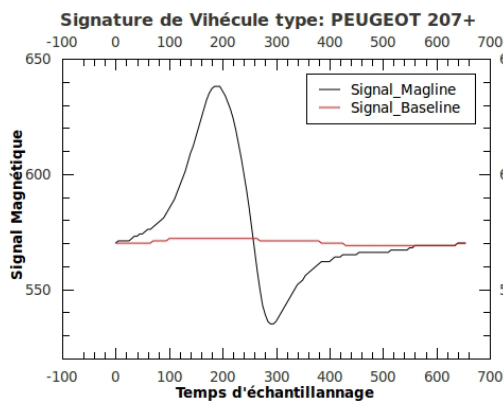


Figure 2.15 : Osc⁺ + Osc⁻

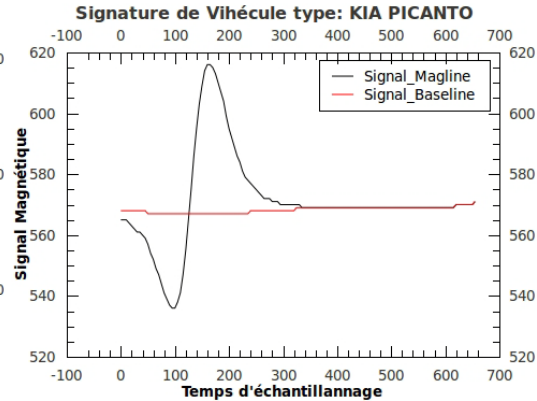


Figure 2.16 : Osc⁻ + Osc⁺

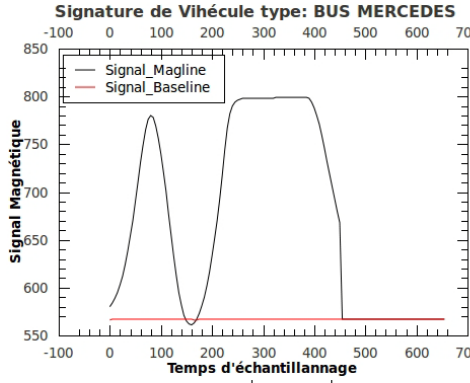


Figure 2.17 : $Osc^+ + Osc^+$

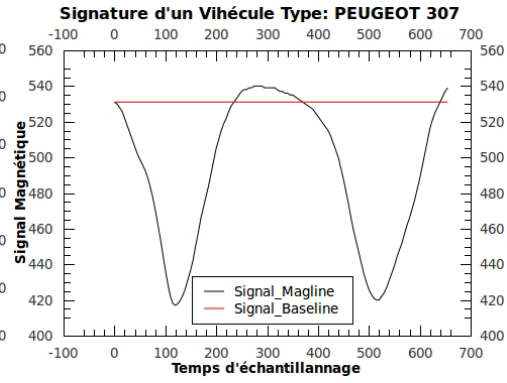


Figure 2.18 : $Osc^- + Osc^-$

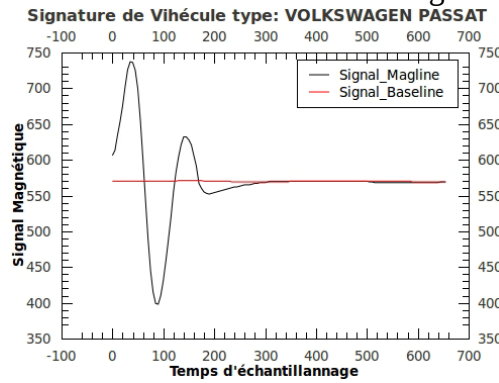


Figure 2.19 : $Osc^+ + Osc^- + Osc^+$

Le travail proposé par [3] a considéré que les signatures des véhicules sont composées de deux oscillations, et que les véhicules qui se déplacent dans un même sens génèrent la même séquence d'oscillations ($Osc^+ + Osc^-$ ou bien $Osc^- + Osc^+$). Dans [1], les auteurs ont observé que les signatures sont généralement composées de deux grandes oscillations et une seule oscillation avec une amplitude assai réduite. Ils ont proposé de transformer ces signatures en des signatures normalisées. Ces travaux ont proposé des algorithmes de détection qui prennent en considération que ces types de signatures qui sont de plus ou moins homogènes. Par contre, de tels algorithmes ne vont pas fonctionner dans le cas des signatures non-homogènes comme est le cas pour notre capteur magnétique HMC1002. Ces algorithmes vont avoir un taux élevé des faux positifs et faux négatifs. Pour résoudre ce problème, nous avons proposé un algorithme qui est basé sur le comptage des oscillations permettant de prendre la bonne décision de détection pour la plupart des types de signatures, et de réduire en maximum les faux positifs et négatifs.

Notre algorithme va se baser pour compter les oscillations sur les deux filtres numériques, **Magline(k)** et **Baseline(k)**, calculés durant la phase de filtrage des données brutes et définis par les équations (2.4) et (2.5). On rappelle que le filtre **Baseline(k)** représente le champ magnétique ambiant et stable de l'environnement, alors que le filtre **Magline(k)** représente les perturbations magnétiques en temps réel qui surviennent autour du capteur.

2.5.3. Définition des états du système de détection

Pour suivre l'évolution du système de détection, on va définir un ensemble d'états logiques qui reflètent l'état de notre algorithme à un moment donné suivant la valeur du signal $Magline(k)$, ils sont résumés dans le Tableau 2.2 suivant :

États du système	Explication
<i>DEMARRAGE</i>	Le capteur est entrain de démarrer tous les composants de base (Radio, magnétomètre ...etc.) nécessaires à son fonctionnement.
<i>SATURATION</i>	Cet état signale que le capteur a été saturé et nécessite un calibrage.
<i>CALIBRAGE</i>	Le capteur reste dans cet état tant qu'il est en phase de calibrage.
$V0=x$ $V1=y$ $V2=z$	Différent état possibles suivent le niveau actuel du signal et les 2 derniers niveaux que le signal a pris. Ils sont utilisés pour compter les oscillations et prendre une décision de détection

Tableau 2.2 : États du système de détection

Cet ensemble d'états va être utilisé lors de la réalisation de l'algorithme de détection et notamment pour le présenter sous forme d'un automate d'état dans le paragraphe qui suit.

2.5.4. Algorithme de détection par comptage des oscillations

Pour réaliser la détection sur des signatures non homogènes, nous allons suivre l'évolution du signal $Magline(k)$.

On définit trois niveaux que le signal $Magline(k)$ peut prendre à chaque instant, à savoir:

- S_{+1} : le signal se situe au-dessus du seuil supérieur c.-à-d. $Magline(k) \geq SeuilSup(k)$
- S_0 : le signal se situe entre le seuil supérieur et le seuil inférieur c.-à-d. $SeuilInf(k) < Magline(k) < SeuilSup(k)$
- S_{-1} : le signal se situe au-dessous du seuil inférieur c.-à-d. $Magline(k) < SeuilInf(k)$

Ces trois niveaux possibles vont nous permettre de compter les oscillations et de décider sur une détection. Pour cela, nous allons utiliser une variable *Compteur_Oscillations*, (compte le nombre d'oscillations d'une signature) et garder trace des trois derniers niveaux que le signal magnétique $Magline(k)$ a pris dans trois variables $V0$, $V1$, $V2$ dont $V2$ est le niveau actuel du signal. Les valeurs du compteur d'oscillation et des trois variables d'historique nous permettent de prendre la décision d'une détection, comme nous allons illustrer par la suite.

On définit un ensemble des cas de détection C , que nous allons énumérer par la suite, pour laquelle une variable $D(k)$ est utilisée pour indiquer la détection ; $D(k)$ est définie par:

$$D(k) = \begin{cases} \text{VRAI} & \text{si } c \in C \text{ \{Ensemble des cas\}} \\ \text{FAUX} & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.10)$$

Le tableau 2.3 présente les différentes valeurs d'états que les variables $State0$, $State1$, et $State2$ peuvent prendre, et les cas possible que le système peut prendre à partir de là :

Cas	V0	V1	V2	Compteur_Oscillations	Action
1	S_0	S_0	S_0	0	Pas d'action
2	S_0	S_0	S_{+1}	0	$D(k) = \text{VRAI}$
3	S_0	S_{+1}	S_0	-	$\text{Compteur_Oscillations} ++$ Si $\text{Compteur_Oscillations} = 2$ alors : $D(k) = \text{FAUX}$ $\text{Compteur_Oscillations} = 0.$ $V1 = S_0$ Fin
4	S_{+1}	S_0	S_{+1}	1	$D(k) = \text{VRAI}$ $\text{Compteur_Oscillations} = 0.$
5	S_{+1}	S_0	S_{-1}	1	Pas d'action.
6	S_0	S_{-1}	S_0	-	$\text{Compteur_Oscillations} ++.$ Si $\text{Compteur_Oscillations} = 2$ alors : $D(k) = \text{FAUX}$ $\text{Compteur_Oscillations} = 0.$ $V1 = S_0$ Fin
7	S_{-1}	S_0	S_{+1}	1	Pas d'action.
8	S_0	S_0	S_{-1}	0	$D(k) = \text{VRAI}$
9	S_{-1}	S_0	S_{-1}	1	$D(k) = \text{VRAI}$ $\text{Compteur_Oscillations} = 0.$

Tableau 2.3 : Différentes Valeurs des variables V0, V1, et V2 et les Actions Prises

Explication des cas du tableau

- **Cas 1** : le cas résultant après calibrage (cas initial) ou après la capture d'une signature complète.
- **Cas 2 et Cas 8**: représentent le début d'une signature, donc le début de la détection. La variable CV (compteur des véhicules) est ainsi incrémentée. Cas 2 montre une détection par une oscillation positive, alors que cas 8 la montre par une oscillation négative.

- **Cas 3 et Cas 6:** se produisent à la fin d'une oscillation (positive: cas 3, ou négative : cas 6). Cette oscillation peut être la première ou la deuxième d'une signature complète. Si c'est la première oscillation, alors le compteur d'oscillations qui était à zéro devient à 1. Si l'oscillation est la deuxième, alors le compteur d'oscillations doit se remettre à zéro, et la détection du passage se termine. La variable V_1 doit être remise à S_0 pour permettre de débiter une nouvelle signature à l'instant suivant (pour avoir, $V_0=S_0$, $V_1=S_0$, $V_2=S_0$).
- **Cas 4 et Cas 9:** représentent une nouvelle oscillation qui a la même allure que la précédente (oscillation positive après une autre positive cas 4, ou négative après une autre négative cas 9). Cela veut dire que l'ancienne signature contient une seule oscillation.
- **Cas 5 et Cas 7:** représente la deuxième oscillation (positive cas 5 ou négative cas 7 qui est complémentaire à la première oscillation négative cas 5 ou positive cas 7) d'une signature complète bien détectée.

Les cas {2, 4, 8, 9} représentent l'ensemble C de l'équation (2.10) de détection.

On définit un temporisateur `On_Stable_Timer` pour compter le temps minimum pendant lequel signal reste au niveau S_0 après la première oscillation. Ceci correspond aux cas 3 et 6. Quand le temporisateur atteint zéro, le compteur d'oscillation est à son tours remit à zéro, et la variable V_1 à S_0 . Cela veut dire qu'on doit mettre fin à la signature en cours, pour bien commencer une nouvelle signature. La portion du code correspondante à ce cas est montrée ci-dessous.

Si $V_2 = S_0$ et $\text{Compteur_Oscillations} = 1$ et $\text{On_Stable_Timer} = 0$ alors :

$D(k) = \text{FAUX}$

$\text{Compteur_Oscillations} = 0$.

$V_1 = S_0$

Fin

On définit le temporisateur, `On_Saturation_Timer`, pour compter le temps minimum pendant lequel le signal reste en état Saturation avant de basculer vers l'état Calibrage et re-initialiser le compteur d'oscillation, ainsi que les variable V_0, V_1, V_2 à S_0 , et $D(k)$ à faux. La portion du code correspondante à ce cas est montrée ci-dessous.

Si $\text{On_Saturation_Timer} = 0$ alors :

$D(k) = \text{FAUX}$

$\text{Compteur_Oscillations} = 0$.

$V_2 = S_0$

$V_1 = S_0$

$V_0 = S_0$

Etat du système = SATURATION

Aller à l'état CALIBRAGE

Fin

Dans ce qui suit, nous allons présenter l'algorithme de détection sous forme d'un automate (figure 2.20) suivi d'un déroulement et d'une explication de son fonctionnement

Initialement, l'automate se trouve à l'état DEMARRAGE, et il y demeure jusqu'à ce que le capteur démarre tous les composants nécessaires à son fonctionnement. Ensuite, l'automate passe automatiquement à l'état CALIBRAGE. Les variables Stable(k) et Saturation(k) indiquent ainsi qu'il nécessite une première stabilisation de ses valeurs magnétiques de sortie en vue de commencer la boucle de surveillance et de détection.

Quand l'automate entre à l'état CALIBRAGE, il entame une tâche de calibrage du capteur jusqu'à ce que la variable Stable(k) indique la fin de calibrage du magnétomètre et Saturation(k) revient à faux, et le niveau du signal Magline(k) prend la valeur S_0 . L'automate passe alors à l'état $V0=S_0, V1=S_0, V2=S_0$ pour dire que le capteur est en mode stable sans perturbation magnétique.

Si un véhicule se présente, les perturbations qu'il cause au champ magnétique terrestre génèrent une signature magnétique, et la variable $V2$ prend le nouveau niveau du signal Magline(k), ainsi les deux dernières valeurs de $V2$ sont automatiquement décalés dans $V1$ et $V0$, respectivement. Par conséquent, le système bascule entre les états $S_0, S_0S_{+1}, S_0S_{+1}S_0, S_0S_0S_{-1}, S_0S_{-1}S_0, S_{+1}S_0S_{+1}, S_{+1}S_0S_{-1}, S_{-1}S_0S_{+1}, S_{-1}S_0S_{-1}$ suivant l'évolution du signal (un exemple de cette évolution est illustrée par la figure 2.21). Le système alors compte les oscillations dans la variable Compteur_Oscillations et test si l'un des cas de détection indiqués par le tableau 2.3 s'est présenté. Si c'est le cas, le système passe à une détection dès que la variable D(k) soit remise à VRAI. Aussitôt que le véhicule passe (fin de la signature), la variable $V2$ est forcément égale à S_0 . Ainsi, la variable Compteur_Oscillation est initialisée à 0, $V1$ et $V0$ à S_0 , et D(k) est remise à FAUX pour commencer une nouvelle détection.

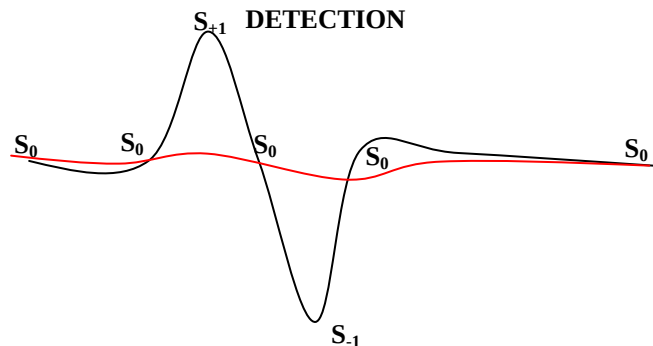


Figure 2.21 : Etats Parcourus par le système suite à une Perturbation.

Quand les perturbations magnétiques sont très fortes, la valeur de sortie du capteur peut être ramenée jusqu'à la zone de saturation, ce qui risque de bloquer le magnétomètre dans cet état et nécessiter un nouveau calibrage. Dans ce cas, la variable Saturation(k) indique cette situation (VRAI), et le système transite vers l'état SATURATION et compte le temps resté dans cet état en décrémentant la variable On Saturation Timer.

Si le temporisateur On Saturation Timer passe à 0, cela indique que le capteur est bloqué en zone de saturation et le système passe à l'état CALIBRAGE pour entamer une nouvelle tâche de calibrage du magnétomètre. Par contre, la variable Saturation(k) indique que le capteur sort de la zone de saturation (FAUX) avant que la variable

On Saturation Timern'atteint0. Le système revient automatiquement à l'ancien état avant sa saturation et le temporisateur est stoppé.

2.5.5. Limitation de l'algorithme de détection par comptage des oscillations

Malgré que l'algorithme de détection par comptage d'oscillations permette de détecter plusieurs types de signatures, il reste tout de même des cas que l'algorithme ne peut pas détecter. Ces cas sont énumérés par la suite :

Cas de signature à 2 Oscillations positives (Resp. négatives) : le système ne peut pas distinguer entre, une signature avec une seule oscillation positive (Resp. négative) de deux véhicules proches, et une signature avec 2 oscillations positive (Resp. négative) d'un seul véhicule, comme montré par les Fig.2.22 et Fig. 2.23. Par conséquent le système va compter cette signature en double ce qui génère un faux positif.

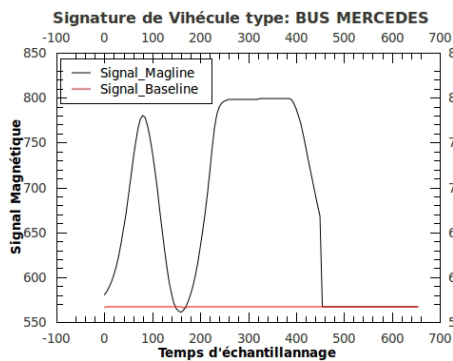


Figure 2.22 : Signature avec 2 Osc⁺

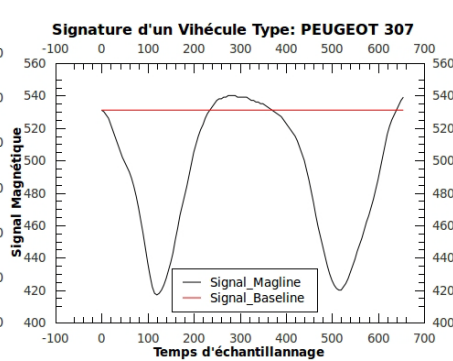


Figure 2.23 : Signature avec 2 Osc⁻

Cas de signature à 3 Oscillations : le système ne peut pas distinguer entre une signature à 3 oscillations d'un seul véhicule et 2 signatures de deux véhicules proches (l'une avec 1 oscillation et l'autre avec 2), comme est montré par la Fig.2.24. Par conséquent, le système va compter cette signature en double, ce qui génère un faux positif aussi.

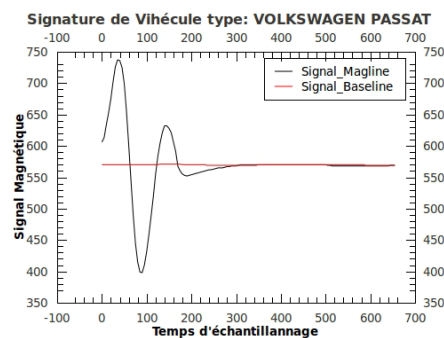


Figure 2.24 : Signature avec 3Osc.

Cas de signature avec des mini Oscillations : le système ne peut pas détecter une signature avec des oscillations qui ne dépassent pas le seuil comme est montré par la Fig.2.25. Par conséquent, le système ne va pas la compter, ce qui génère un faux négatif.

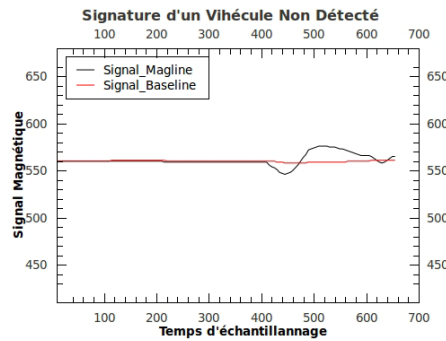


Figure 2.25 : Signature avec Mini Oscillations.

2.6. Algorithme de Classification des Véhicules

Cette section va traiter l'aspect classification de véhicules après détection. La tâche de classification consiste à essayer de déduire le type ou la classe du véhicule détecté à partir de sa signature magnétique. Cette dernière diffère d'un type de véhicule à un autre selon la quantité et la distribution de la masse métallique qu'il contient. Chaque signature est enregistrée dans un tableau ou un vecteur de données que l'algorithme de classification va traiter pour donner une décision de classification correspondante. Le procédé de cette tâche est décrit comme suit :

- Extraction de la signature magnétique du véhicule:
Permet de récupérer les données magnétiques du véhicule détecté.
- Transformation et compression de la signature:
Consiste à normaliser le vecteur de la signature avec plusieurs traitements mathématiques afin de diminuer sa taille et l'amplitude de ses valeurs.
- Analyse et classification:
Représente le passage à l'automate et la classification finale du véhicule détecté.

Le schéma global de l'algorithme de classification est donné par la figure 2.26:

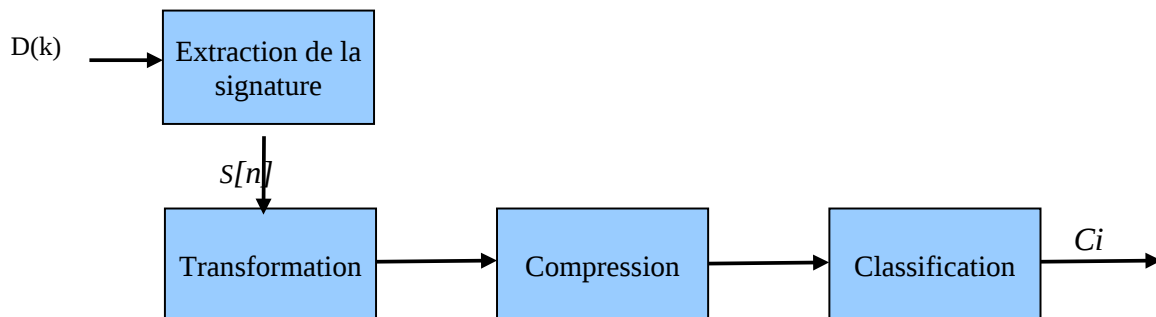


Figure 2.26 : Schéma logique de l'algorithme de classification

2.6.1. Extraction de la signature magnétique

L'événement de détection signalé par la variable $D(k)$ lance l'opération d'extraction de la signature magnétique. Celle-ci consiste à récupérer toutes les valeurs du champ magnétique pendant la détection en commençant par la première valeur, noté

Magline($k_{début}$), jusqu'au dernier échantillon de la signature, noté **Magline**(k_{fin}). Tous les échantillons récoltés pendant la détection sont enregistrés dans un tableau qui représente la signature magnétique de notre véhicule :

$$S(n) = \{Magline(k)\} \text{ avec } k_{début} \leq k \leq k_{fin} \quad (2.11)$$

Notons par $n = (k_{fin} - k_{début}) + 1$ la taille de cette signature. Comme les véhicules n'ont pas tous les mêmes longueurs et peuvent voyager devant le capteur avec des vitesses variables, la signature $S[n]$ peut avoir une taille n différente d'une détection à une autre. La taille de la signature augmente très rapidement, ce qui empêche un traitement direct en temps réel par le capteur. L'application de transformations mathématiques est donc nécessaire pour diminuer sa taille et normaliser ses valeurs.

2.6.2. Transformation du vecteur de signature

La signature $S[n]$ précédente sera transformée en une signature $T[N]$ de taille N fixe grâce à l'application, sur l'ensemble des valeurs de la signature, d'une opération mathématique appelée « *Average Bar* », qu'on peut résumer par les étapes suivantes :

- Diviser le vecteur de signature $S[n]$ en N sous vecteurs de taille égale.
- Remplacer chaque sous vecteur par la moyenne des valeurs qu'il contient.
- Sauvegarder toutes les moyennes calculées dans le vecteur de la signature transformée $T[N]$.

La valeur N peut être fixée lors de la phase des tests de l'algorithme mais une valeur de 10 à 20 barres de moyenne est suffisante en théorie pour garder l'essentiel d'informations contenues dans la signature magnétique d'origine.

2.6.3. Compression de l'amplitude de la signature

On va compresser les amplitudes de la signature $T[N]$ précédente pour donner un vecteur de signature $P[N]$ dont les valeurs de sortie seront normalisées en quelques niveaux d'amplitude prédéfinies. Cette opération est la dernière étape de transformation avant la classification finale. Elle est appelée la technique de compression « **Hill Pattern** ». Les niveaux d'amplitudes que nous avons définis sont donnés comme suit :

$$P(N) = \begin{cases} +3 & \text{si } T(N) \geq 700, \\ +2 & \text{si } 600 \leq T(N) \leq 700, \\ +1 & \text{si } SeuilSup \leq T(N) \leq 600, \\ 0 & \text{si } SeuilInf \leq T(N) \leq SeuilSup, \\ -1 & \text{si } T(N) \geq 400, \\ -2 & \text{si } 300 \leq T(N) \leq 400, \\ -3 & \text{si } T(N) \leq 300, \end{cases} \quad (2.12)$$

2.6.4. Algorithme de classification par Niveau d'Amplitude

On sait que la puissance des perturbations magnétiques causées par un véhicule donné et la nature de sa signature varient d'une situation à une autre selon les facteurs suivants :

- L'orientation de l'axe magnétique du capteur par rapport à la route.
- La distance qui sépare le capteur magnétique du véhicule surveillé.

- La vitesse du véhicule lors de son passage devant le capteur.
- La masse métallique et le volume total du véhicule en question.

Si on suppose que l'orientation du capteur magnétique ainsi que la distance qui le sépare des véhicules de passage seront choisis et fixés lors de l'étape des tests et ne changeront pas durant toute l'expérience de détection et de classification, la nature de la signature magnétique d'un véhicule donné ne dépendra plus que de sa vitesse et de sa masse métallique. Pour cela et afin d'éliminer l'effet de la vitesse sur la décision de classification, toute signature, $S[n]$, captée est transformée en une signature de taille fixe, $T[N]$, afin de mettre toutes les signatures des véhicules sur la même échelle de temps quelle que soit leur vitesse. La signature, $T[N]$, est par la suite compressée et normalisée en quelques niveaux d'amplitudes par la signature, $P[N]$, pour rendre la classification finale d'un véhicule donné dépendante seulement de la puissance des perturbations magnétiques qu'il a causé et qui reflètent sa masse métallique, et donc son volume réel. Pour notre algorithme, nous avons défini **trois (3) classes** de véhicules différentes, selon le niveau des amplitudes définies précédemment:

- **Classe 1 (Véhicules légers)** : regroupe toutes les véhicules touristique à usage personnel.
- **Classe 2 (Véhicules moyens)** : représente les véhicules utilitaires comme les fourgons et les camionnettes.
- **Classe 3 (Véhicules lourds)** : représente les camions et les bus.

Du fait que les perturbations magnétiques peuvent être oscillatoires de façon symétrique par rapport à la zone stable médiane du capteur, chacune des trois classes précédentes est représentée par les niveaux d'amplitudes symétriques $\{+1,-1\}$, $\{+2,-2\}$ et $\{+3,-3\}$, respectivement dans l'ordre. L'algorithme de classification utilisé se base sur ces niveaux d'amplitudes. Le nombre d'occurrences de chaque ensemble d'amplitudes symétriques sera compté pour prendre la classe de celui qui se répète le plus dans la signature. La *figure 2.27* schématise de façon détaillée l'algorithme de classification que nous avons adopté pour notre système de détection.

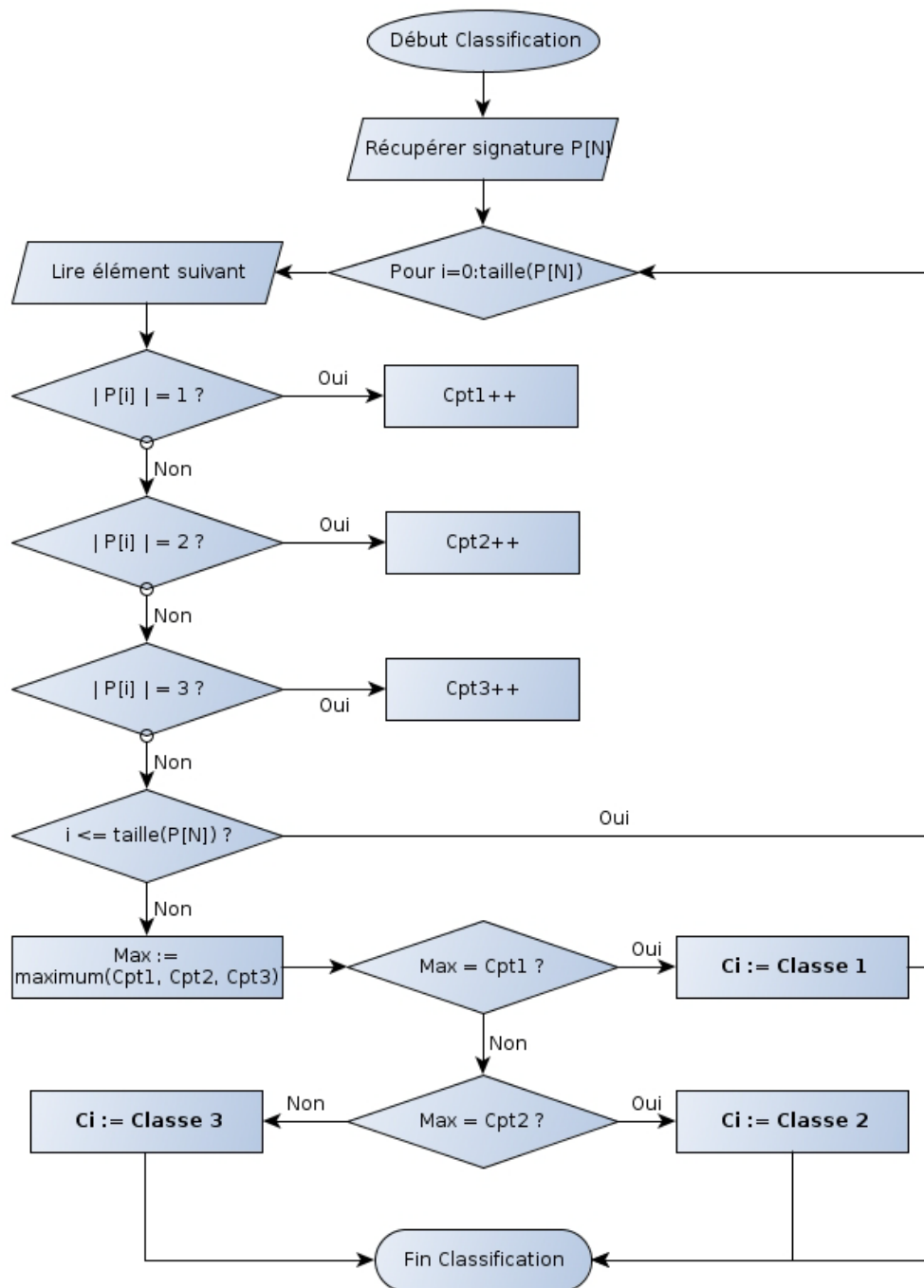


Figure 2.27 : Organigramme de l'algorithme de classification

3. EXPERIMENTATIONS ET TESTE DE PERFORMANCE

Pour les expérimentations et les tests de performance de notre système, nous avons utilisé un kit de capteurs *MicaZ* composé de nœuds capteur et une station de base connectée à un ordinateur portable. Chaque capteur est composé d'un mote *MicaZ*, et une carte de captage de type *MTS310CA* dotée d'un magnétomètre (voir *figure 3.1*).

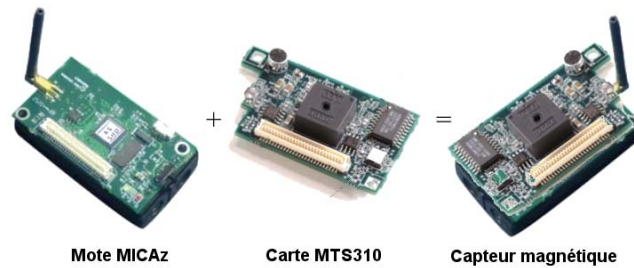


Figure 3.1 – Composition d'un capteur magnétique

Le mote *MicaZ* contient un microcontrôleur, une antenne de transmission sans fil et une unité d'énergie (2 batteries de type AA 1.5v). Le microcontrôleur contient une mémoire flash de 128kB, une mémoire vive de 4kB, et un processeur de 8MHz, c'est la partie de calcul et de traitement des informations des capteurs. L'antenne radio est un module transceiver dans la bande de fréquence radio 2.4 GHz avec un débit binaire allant jusqu'à 250kbps. Ce dernier est le module de communication permettant des transmissions sans fil entre les capteurs, les nœuds relais, et la station de base. Les nœuds relais quant à eux sont de simples motes *MicaZ* sans carte de captage. Ces nœuds assurent l'acheminement des messages et le maintien de la communication entre la station de base et les capteurs distants. La station de base est un mote *MicaZ* attaché une carte de programmation *MIB520CB* connectée à un Ordinateur portable via un port série « USB ».

3.1. Les paramètres de l'expérimentation

Avant de tester les algorithmes de détection et de classification des véhicules, nous devons fixer au préalable plusieurs paramètres externes, comme la disposition du capteur magnétique sur la route, ou internes, comme les différents coefficients de l'algorithme.

3.1.1. Emplacement du capteur magnétique

Lors de la phase de tests, le capteur magnétique peut être placé soit en bord de route, soit en plein milieu de la route (sous la chaussée ou bien au-dessus des véhicules). Nous avons mis le capteur dans les deux positions, c'est-à-dire au milieu de la route et à côté durant des tests préliminaires. On a eu des résultats montrant la faisabilité des deux emplacements, mais vu le handicap de mettre le capteur au-dessous des véhicules dans nos tests *intensifs réels*, nous avons choisi de garder l'emplacement du capteur, pour les tests de détection, en bord de route.

En théorie, le capteur possède un rayon de captage de 3 mètres environ. Cependant, les tests que nous avons mené pour nous a permis de constater qu'il détectait rarement les véhicules loin de 2 mètres, surtout s'il s'agit de véhicules légers. Nous avons effectué, durant notre visite à la ville de Constantine dans le cadre d'un plan de circulation, des tests intensifs dans un rondpoint. Un parmi les buts de ces tests était de montrer l'influence de la distance du capteur sur les résultats de la détection. Le test a été fait pendant deux jours à travers 3 scénarios:

Dans le premier scénario de test, on a mis notre capteur à côté de la route pendant 2 heures. Le capteur détectait les véhicules qui passaient avec une fiabilité qui ne dépassait pas les 50%. Le problème était lié à la distance entre le capteur et les véhicules qui passent, qui parfois dépassait 1.5 mètres.

Dans le deuxième scénario, on a essayé de mettre des cônes des gendarmes dans la route pour délimiter le passage de véhicules dans le couloir de route dans le but d'avoir

un passage de véhicules soit loin de capteurs mais qui ne font pas l'objet d'être compté, soit le passage à l'intérieur du couloir mais correctement compté. La fiabilité de ce test était 73.4%. Le problème était l'interférence des véhicules qui passent de l'autre côté derrière le capteur causent des doubles détections.

Dans le deuxième scénario, nous avons mis le capteur dans un endroit de sorte que les véhicules ne dépassent pas la distance 1.5m du capteur, en éliminant les interférences. La fiabilité de ce test a été de l'ordre de 91.6%. Le tableau 3.1 présente une comparaison entre le comptage manuel et les trois scénarios de comptage effectués, ainsi que les paramètres utilisés:

Paramètres	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3
Disposition du Capteur	À côté de la route.	À côté de la route.	À côté de la route.
Distance entre les véhicules et le capteur	Entre 1m et 2.5m	$\leq 1.5m$	$\leq 1.5m$
Interférence avec les autres files de véhicules	Non présent	Présent	Non présent
Nombre de véhicules avec le comptage manuel	-	111	89
Nombre de véhicules avec le comptage automatique	-	151	96
Fiabilité	50%	73.5%	92.7%

Tableau 3.1 : Résultats de détection obtenus.

3.1.2. Orientation de l'axe magnétique

Comme expliqué dans la section 3.3, le magnétomètre possède deux (2) axes magnétiques X et Y dont un seul suffit pour surveiller les perturbations magnétiques dans un environnement donné. Nous avons remarqué que la sensibilité du capteur aux perturbations causées par les véhicules est maximale quand ces derniers arrivent dans le sens opposé à celui de l'orientation de l'axe magnétique que nous avons utilisé, soit l'axe X (voir la figure 3.2).

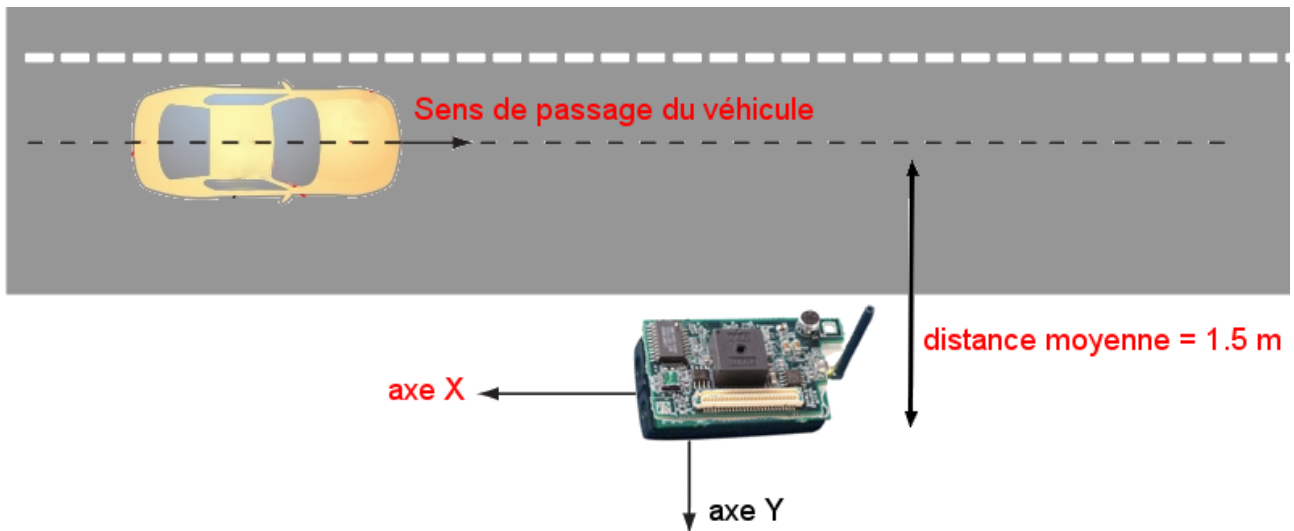


Figure 3.2 – Orientation de l'axe magnétique et disposition du capteur sur la route

3.1.3. Coefficients des filtres numériques (α , β)

Nous avons utilisé deux filtres numériques $Magline(k)$ et $Baseline(k)$ qui représentent, respectivement, le champ magnétique réel après filtrage des bruits et le champ magnétique ambiant de l'environnement. Nous avons exprimé ces deux champs par les deux équations (2.4) et (2.5). Les coefficients (α_1 , β_1) et (α_2 , β_2) déterminent la sortie correspondant aux deux filtres précédents. Après plusieurs tests, nous avons obtenus des meilleurs résultats avec les valeurs des coefficients suivantes :

$$\begin{aligned} Magline(k) & : \alpha_1 = 1/8, & \beta_1 = (1-\alpha_1) = 7/8 \\ Baseline(k) & : \alpha_2 = 1/64, & \beta_2 = (1-\alpha_2) = 63/64 \end{aligned}$$

La figure 3.3 montre l'affichage graphique de l'oscilloscope représentant le résultat de sortie de ces deux filtres par rapport aux valeurs brutes lors d'une perturbation magnétique du capteur.

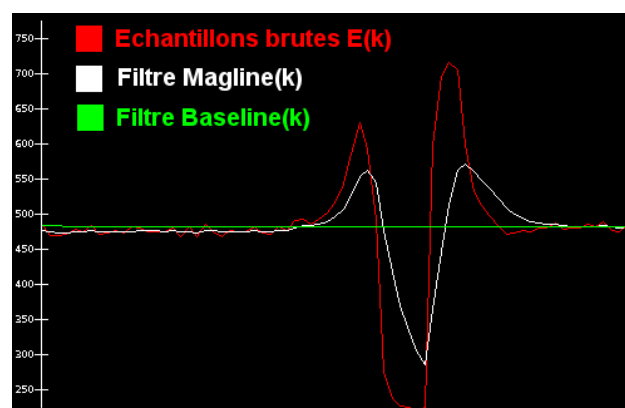


Figure 3.3 – Aperçu des échantillons brutes et des filtres magnétiques sur l'oscilloscope

3.1.4. Le paramètre (Δ) du Seuil de détection

Le paramètre Δ représente la différence minimale entre la valeur du champ magnétique filtré $Magline(k)$ et du champ ambiant de l'environnement $Baseline(k)$ qui permet de calculer les seuils $SeuilSup(k)$ et $SeuilInf(k)$. Ce paramètre Δ est fixé

selon le scénario de test et l'emplacement du capteur sur la route. Plus on s'approche de la trajectoire des véhicules, plus la valeur du seuil doit être la plus grande, et inversement; cela dit que cette valeur ne peut être fixée que suite à plusieurs tests réels pour pouvoir choisir sa valeur adéquate.

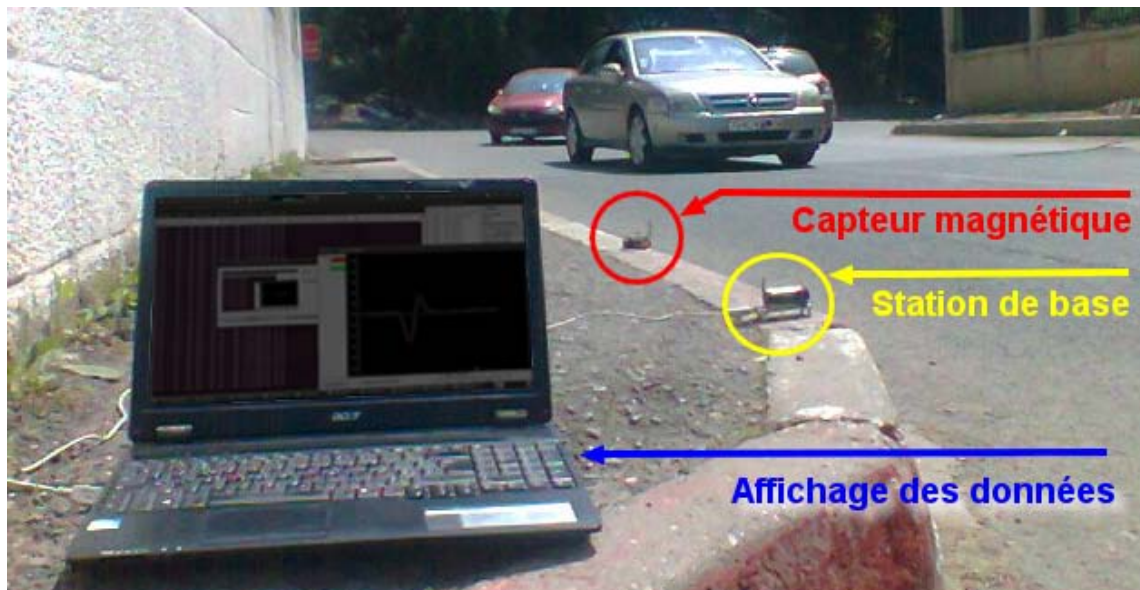


Figure 3.4 – Scénario d’expérience pour le choix du paramètre Delta.

Dans notre cas, nous avons effectué plusieurs tests avec des seuils différents (voir figure 3.4). Dans ce scénario, le capteur magnétique est placé en bord d'une route à double sens (une file pour chaque sens) où il est chargé de détecter les véhicules passant par la première file. Le paramètre de distance dans cette expérience a été fixé à environ 1.50 m des véhicules et l'emplacement du capteur magnétique était en bord de la route (sur le trottoir). Nous avons varié la valeur du paramètre *Delta* (Seuil minimal de détection) à savoir $\Delta = 40$ dans le premier test, et $\Delta = 15$ dans le deuxième test, tout en mesurant la fiabilité de détection de notre algorithme. Le tableau 3.2 résume les résultats obtenus par ces tests.

Le seuil minimal choisis	$\Delta = 40$	$\Delta = 15$
Nombre total de véhicules	100	100
Véhicules détectés	69	91
Faux positifs (fausses détections des véhicules dans le sens opposé)	0	1
Faux négatifs (véhicules non détectés)	31	10
Fiabilité de l'algorithme de détection	69,00%	90,00%

Tableau 3.2 : Résultats de détection obtenus par les tests sur le paramètre Delta.

Sur un passage de **100** véhicules différents et avec une valeur du paramètre *Delta* fixée à **40**, le capteur a pu détecter **69** véhicules passant par la file de route où le capteur est posé sans signaler aucune fausse détection des véhicules passant par la deuxième file dans le sens opposé. La fiabilité de détection est de **69%**, ce qui représente un résultat peu satisfaisant pour que l'algorithme actuel soit déployé et adopté comme solution finale. Pour le deuxième scénario, nous avons gardé le même emplacement du capteur

sur la route sauf pour le seuil de détection *Delta* que nous avons réduit à 15. Nous pouvons voir qu'après modification du seuil de détection, la fiabilité de l'algorithme a augmenté de façon considérable pour atteindre **90%**. Cependant, le fait d'avoir diminué le seuil a conduit le capteur à signaler une fausse détection concernant un camion passant par la deuxième file de la route dans le sens inverse.

Comme nous avons mis le capteur en bord de route à environ 1.5 m des véhicules dans la majorité de nos tests, nous avons trouvé que la valeur du seuil ***Delta*** offrant une meilleure fiabilité de détection dans ce cas correspond à, $\Delta = 15$, ce qui donne les seuils de détection suivants :

$$SeuilSup(k) = Baseline(k) + 15 \quad (3.1)$$

et

$$SeuilInf(k) = Baseline(k) - 15 \quad (3.2)$$

3.2. Fiabilité de l'algorithme de calibrage

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus avec les tests réels de l'algorithme de calibrage. Ensuite, nous allons proposer une amélioration de l'algorithme pour optimiser le temps de calibrage du capteur magnétique. Lors de la phase de calibrage du magnétomètre, nous devons ajuster son potentiomètre pour ramener les valeurs de sortie du capteur à l'intervalle défini par la **zone stable [450, 550]** comme expliqué dans la section précédente. Après plusieurs tests de calibrage, nous avons constaté que les valeurs du compteur d'ajustement (*adj_cpt*) avec lesquelles le magnétomètre se calibre varient seulement dans l'intervalle [0, 128] du potentiomètre au lieu de l'intervalle [0, 255]. Cette variation est due au changement de l'orientation de l'axe magnétique ou de l'emplacement du capteur dans l'environnement. Pendant le processus de recherche de la valeur du compteur d'ajustement permettant de calibrer le capteur, nous avons observé que les valeurs inférieures à la valeur de calibrage causent une saturation du magnétomètre sur sa zone de saturation supérieure [700, 800], et les valeurs supérieures à la valeur de calibrage causent une saturation du magnétomètre sur sa zone de saturation inférieure [200, 300]. Il y a donc une relation disproportionnée entre les valeurs du potentiomètre appliquées et les valeurs de sortie du magnétomètre après chaque commande d'ajustement comme on peut le voir dans les graphes de la *figure 3.5*. D'un autre côté, comme la valeur du compteur d'ajustement est dynamique dans l'intervalle [0, 128], le temps de calibrage du magnétomètre peut être très important et cela ne convient pas aux exigences de notre système de détection. Du fait que la période de lecture de chaque échantillon magnétique est de $Pe = 1/Fe = 10 \text{ ms}$, le temps théorique de calibrage peut atteindre $Tc = 10\text{ms} * 128 = 1280 \text{ ms}$, et parfois plus, si le compteur d'ajustement est réinitialisé pendant le calibrage. Ce temps est inapproprié dans la phase de détection, car le capteur peut rater le passage d'un ou de plusieurs véhicules si leur vitesse est très élevée.

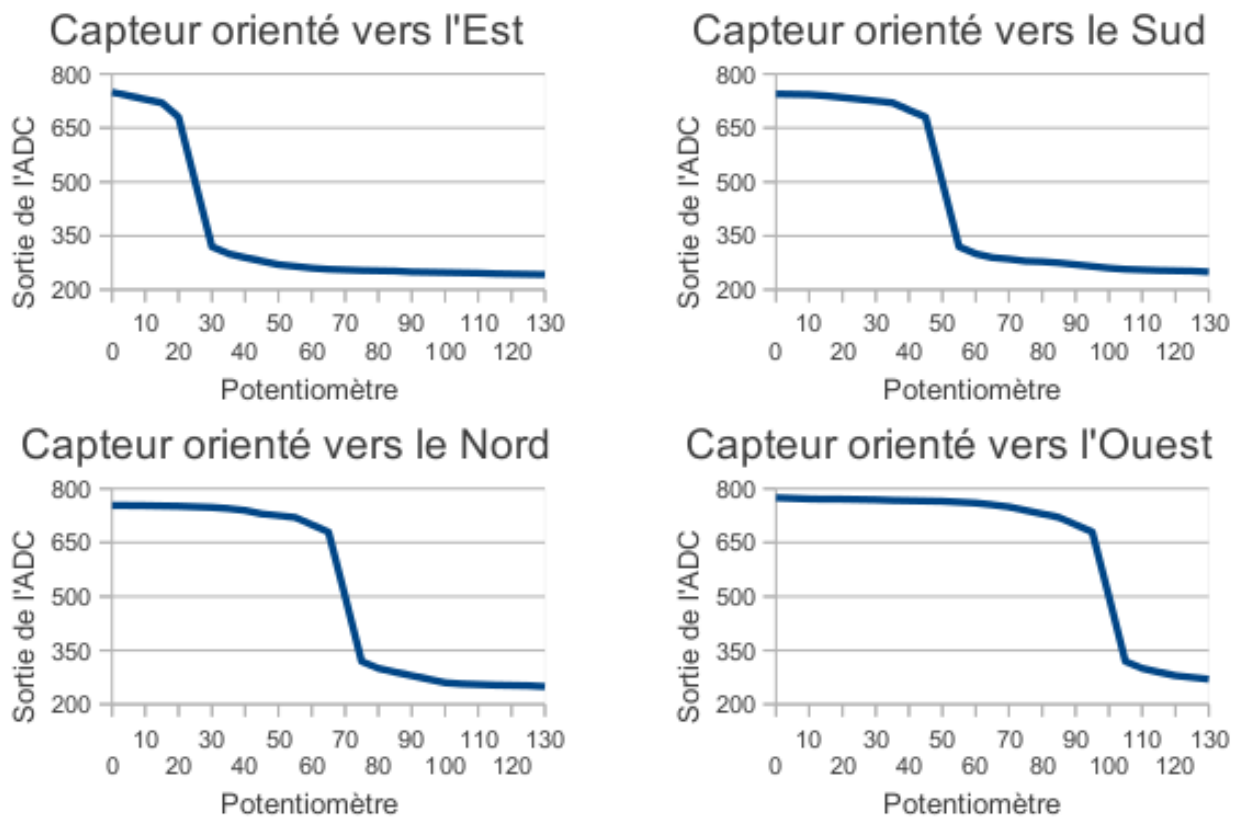


Figure 3.5 – Graphes de calibrage en fonction de l'orientation du capteur

3.2.1. Optimisation du temps de calibrage

Nous avons proposé une optimisation pour minimiser le temps de calibrage du capteur. Au lieu de parcourir l'intervalle du potentiomètre [0, 128] par incrémentation simple, nous avons cette fois utilisé une «*variable d'ajustement*» et une «*variable de saut*» pour parcourir l'intervalle précédent avec une méthode de recherche par division et élimination, afin de trouver la valeur de calibrage le plus rapidement possible ; cette méthode est proche de la technique algorithmique dite «*Diviser pour régner*», et la démarche suivie est donnée par l'algorithme suivant :

```
// Intervalle d'ajustement du potentiomètre : [0, 128]
// Déclaration des variables de lecture, d'ajustement et de saut
Entrée :mag_val, adj_cpt, jump : Entier;
Initialisation :
adj_cpt ← 128;    // 128 : La borne supérieure de l'intervalle
jump    ← (128/2); // 64 : La moitié de l'intervalle

FonctionLireEchantillonSuivant()
    Lancer la commande de lecture magnétique;
    mag_val ← Récupérer valeur retournée par l'ADC;
    Si ((450 <= mag_val) ET (mag_val <= 550)) alors
        // Calibrage fini, zone stable atteinte !
        // Débuter le fonctionnement normal du capteur ...
    Sinon
        Si (mag_val < 450) alors
            // Capteur proche de la zone de saturation inférieure
            // Décrémenter la variable d'un saut
```

```

        adj_cpt ← (adj_cpt - jump);
    Sinon Si (mag_val > 550) alors
        // Capteur proche de la zone de saturation supérieure
        // Incrémenter la variable d'un saut
        adj_cpt ← (adj_cpt + jump);
    Fin si
    Si (jump > 1) alors
        jump ← (jump/2); // Division du saut à chaque itération
    Fin si
    // Appeler la fonction de calibration
    Appel Calibrage();
    Fin si
Fin fonction

Fonction Calibrage()
    // Appliquer la commande de calibration
    AjusterPotentiometre(adj_cpt);

    // Réinitialiser les compteurs s'il le faut
    Si (jump = 1) alors
        Si ((adj_cpt = 0) OU (adj_cpt = 128)) alors
            adj_cpt ← 128;
            jump ← (128/2);
        Fin si
    Fin si
Fin fonction

```

Avec l'algorithme amélioré, nous avons obtenu des temps de calibration beaucoup moins longs de l'ordre de 200 ms en moyenne, c'est à dire que l'algorithme arrive à retrouver la valeur du potentiomètre qui permet de calibrer la capteur après seulement vingt (20) tentatives de recherche en moyenne au lieu des 128 possibles avec l'algorithme initial. Cela indépendamment de l'orientation du capteur magnétique ou de l'environnement dans lequel il se trouve. Ce gain important en temps de calibration nous permet de s'assurer que même si le capteur se sature en plein fonctionnement, il peut très vite se calibrer sans pour autant rater un passage potentiel d'un véhicule.

3.3. Fiabilité de l'algorithme de détection

Après les tests sur les paramètres de l'algorithme, nous avons utilisé les paramètres optimaux obtenus pour mesurer la fiabilité de l'algorithme de détection. Nous avons effectué des tests dans deux endroits différents sur plusieurs échantillons de véhicules pour chaque endroit. Les paramètres utilisés sont résumé dans le tableau 3.3.

Paramètres	Valeur
Disposition du Capteur	À côté de la route.
Distance entre les véhicules et le capteur	$\leq 1.5\text{m}$
Paramètre Δ	15
Fréquence d'échantillonnage	100 Hz
Coefficients $\alpha_1, \beta_1 - \alpha_2, \beta_2$	1/8, 7/8 - 1/64, 63/64

Tableau 3.3 : Paramètres Optimaux de l'algorithme de détection.

Pour nos expérimentations, nous avons utilisé une interface adéquate pour afficher le signal magnétiques et le comptage des véhicules réalisé par l’algorithme en temps réel, et une caméra intégré sur le Laptop (voir *figure 3.6*) pour filmer le passage des véhicules. Ceci nous a permet par la suite d’analyser les signatures et compter le nombre réel de véhicules (offline).



Figure 3.6 : Interface de Visualisation du Signal Magnétique.

- 1) **Scénario(1)** : Nous avons choisi un endroit dans une route à double sens où le passage des véhicules dans la voie opposée peut causer des interférences sur le champ magnétique. Ceci peut avoir des conséquences indésirables sur les résultats de détection. Le flux de véhicules n’étant pas élevé et la vitesse des véhicules de passage étaient comprises entre 0Km/h et 50Km/h. L’objectif derrière cette expérimentation est de montrer la fiabilité de l’algorithme de détection dans le scénario où les interférences du champ magnétique de la voie du sens opposé sont présentes. Nous avons effectué des tests sur deux échantillons de véhicules ; le 1^{er} est un échantillon de 259 véhicules et le 2^{ème} échantillon est de 265 véhicules. Le tableau 3.4 résume les résultats obtenus, et la *figure 3.7* montre la fiabilité de chacun de ces tests.

Résultat	Echantillon 1	Echantillon 2
Nombre réel de véhicules	259	265
Les faux positives	15	2
Les faux négatives	6	20
Fiabilité	91.89	91.6

Tableau 3.4 : Résumé des résultats du Scénario (1).

Nous remarquons que la fiabilité de l’algorithme de détection à la présence des interférences des autres voies est de l’ordre de 91.75%, ce qui est un résultat très admissible.

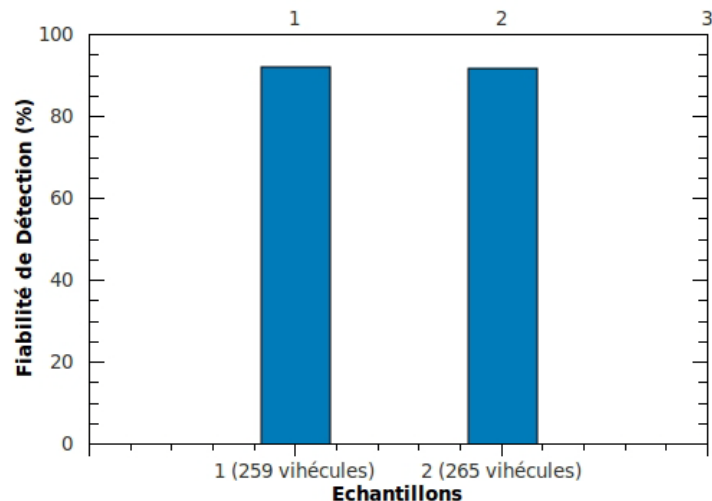


Figure 3.7 : Fiabilité des tests du scénario (1).

- 2) **Scénario(2)** : dans ce scénario, nous avons choisi un autre endroit avec autres spécifications. Le carrefour du stade du 5 juillet à Ben-aknoun a été choisi où nous avons décidé de placer notre capteur magnétique au bord de l'une des voies entrantes au le rondpoint. Le rondpoint est situé dans une autoroute à plusieurs voies, mais qui se rétrécies en une seul à l'entrée du carrefour. Les interférences causées par les autres voies sont absentes et les paramètres définis précédemment sont vérifiés. Le flux de véhicules étant trop élevé, et la vitesse moyenne des véhicules de passage étaient comprises entre 0Km/h et 25Km/h. L'objectif derrière cette expérimentation est de montrer la fiabilité de l'algorithme de détection dans le scénario où les interférences du champ magnétique des autres voies sont absentes. Nous avons effectué des tests extensifs sur 7 échantillons différents de véhicules; le 1^{er} est un échantillon de 371véhicules, le 2^{ième} est de 321 véhicules, le 3^{ième} est de 261, le 4^{ième} de 281, le 5^{ième} de 292, le 6^{ième} de 850, et enfin le 7^{ième} est de 612 véhicules. Le tableau 3.5 résume les résultats obtenus, tandis que la *figure 3.8* montre la fiabilité de chacun de ces tests.

Echantillons	1	2	3	4	5	6	7
Nombre réel de véhicules	376	321	261	281	292	850	612
Les faux positives	-	-	20	11	18	42	22
Les fau négatives	-	-	6	8	19	16	21
Fiabilité	84.04%	89.4%	95.4%	97.9%	99.3%	96.9%	99.8%

Tableau 3.5 : Résumé des résultats du Scénario (2).

Nous avons constaté que l'algorithme de détection en l'absence des interférences des autres vois est améliorée par rapport au scénario précédent, ou la moyenne est de l'ordre de 94.59%.

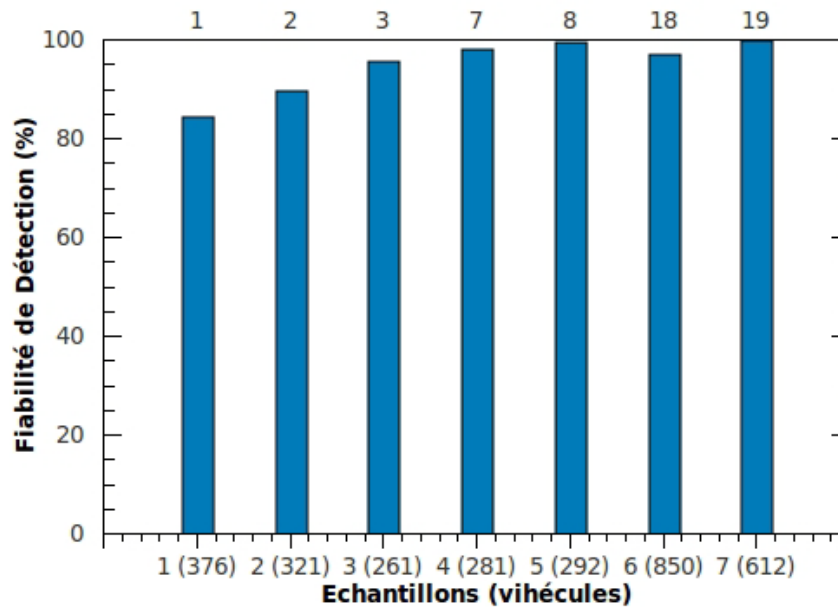


Figure 3.8 : Fiabilité des tests du scénario (2).

3.4. Tests de l'algorithme de classification

Avant de donner les résultats de l'expérience réelle menée pour tester notre algorithme de classification, nous allons présenter à quoi ressemblent les signatures magnétiques après les processus de transformation et de compression appliqués par l'algorithme. Pendant l'expérience réelle, nous avons constaté que la majorité des véhicules qui transitaient par la route où nous avons effectué les tests étaient des voitures de ville de poids léger avec parfois le passage de véhicules utilitaires comme les fourgons ou les camionnettes, et plus rarement encore le passage de véhicules lourds comme les bus de transport ou les camions.

3.4.1. Transformation de la signature en vecteur de moyennes

Chaque signature magnétique extraite suite au passage d'un véhicule peut avoir une quantité d'échantillons variable et doit être transformée en un vecteur de taille fixe pour rendre d'une part les décisions de classification indépendantes des longueurs des signatures, et d'autre part simplifier les calculs de l'algorithme de classification. Nous avons fixé la taille du vecteur des signatures transformées à **20** barres de moyennes.

Les graphes de la *figure 3.9* représentent les transformations des exemples de signatures "A", "B" et "C" vues dans la section précédente, alors que la *figure 3.10* donne les valeurs des signatures transformées tel envoyées par le capteur et affichées sur la console :

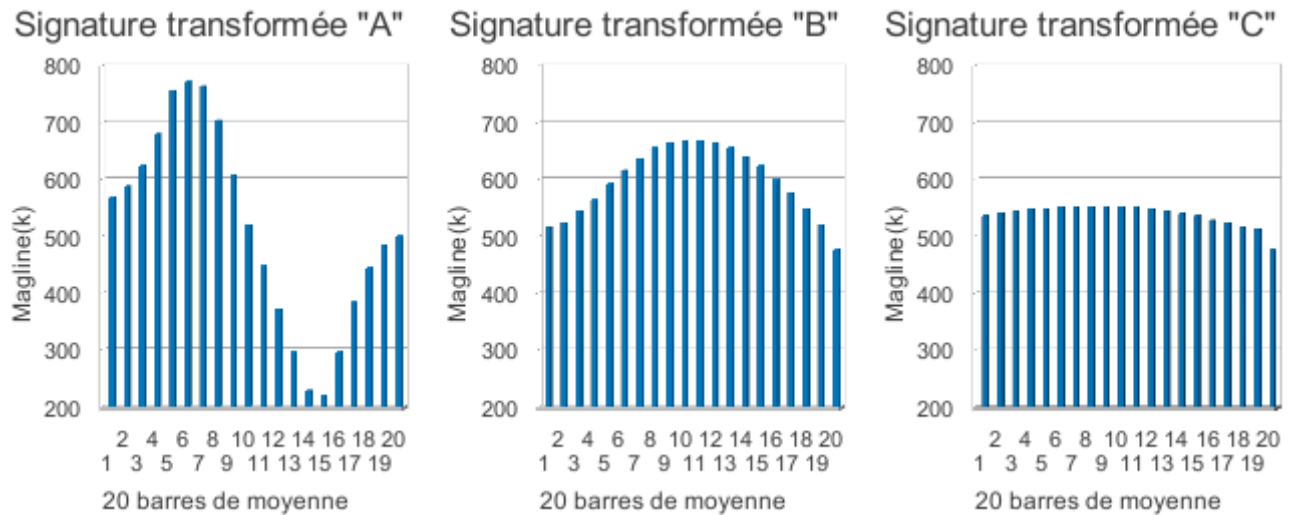


Figure 3.9 – Formes générales des signatures magnétiques après transformation

Signature Transformée "A" :
568, 588, 624, 680, 756, 772, 764, 704, 608, 520, 448, 372, 296, 228, 220, 296, 384, 444, 484, 500
. . .
Signature Transformée "B" :
516, 524, 544, 564, 592, 616, 636, 656, 664, 668, 668, 664, 656, 640, 624, 600, 576, 548, 520, 476
. . .
Signature Transformée "C" :
536, 540, 544, 548, 548, 552, 552, 552, 552, 552, 548, 544, 540, 536, 528, 524, 516, 512, 476

Figure 3.10 – Affichage des signatures transformées sur la console

3.4.2. Compression de la signature magnétique

Afin de simplifier les décisions de classification des véhicules détectés, l'algorithme procédera à une compression des amplitudes de la signature transformée pour arriver à différencier les classes de véhicules que nous avons définis dans la conception. Pour l'exemple des trois signatures précédentes, les résultats de compression obtenus sont tracés dans les graphes de la *figure 3.11*:

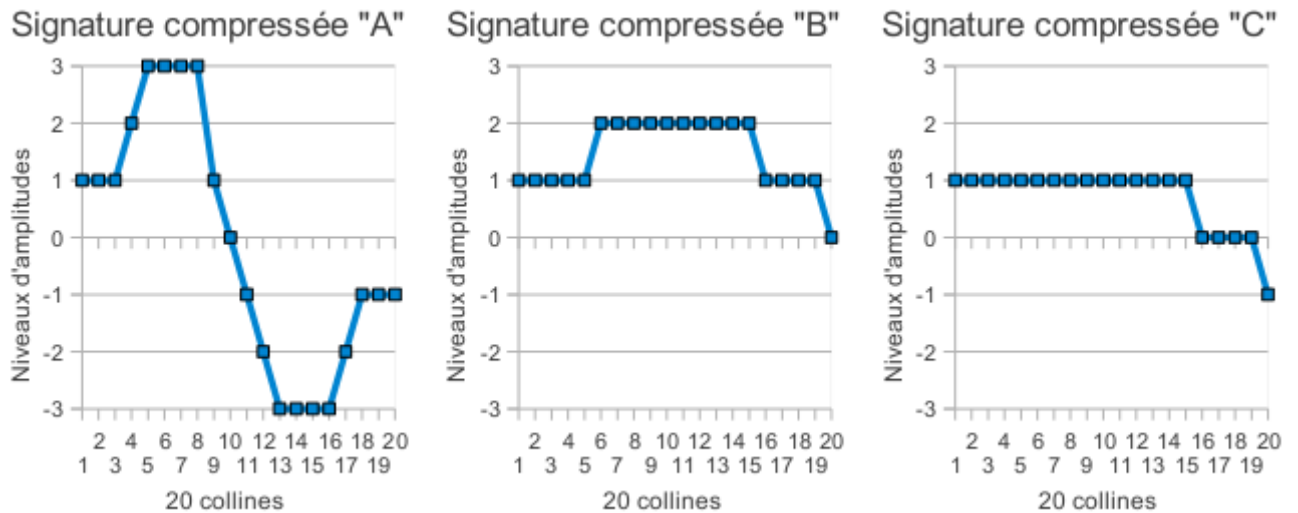


Figure 3.11 – Compression des signatures magnétiques en motifs à collines

Les valeurs correspondantes à ces signatures compressées tel envoyées par le capteur, leurs seuils respectifs au moment de la détection, ainsi que les décisions de classifications prises par l'algorithme sont donnés par la *figure 3.12* suivante :

```
Signature Compressée "A" (SeuilInf = 510; SeuilSup = 560):
  1, 1, 1, 2, 3, 3, 3, 3, 1, 0, -1, -2, -3, -3, -3, -3, -2, -1, -1, -1
Cpt1 = 8, Cpt2 = 3, Cpt3 = 8
Le véhicule appartient à la CLASSE 3 > LOURD (Camion, Bus, Cous)
. . .

Signature Compressée "B" (SeuilInf = 464; SeuilSup = 514):
  1, 1, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 1, 1, 1, 1, 0
Cpt1 = 9 Cpt2 = 10 Cpt3 = 0
Le véhicule appartient à la CLASSE 2 > MOYEN (Véhicule utilitaire)
. . .

Signature Compressée "C" (SeuilInf = 484; SeuilSup = 536):
  1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, -1
Cpt1 = 16 Cpt2 = 0 Cpt3 = 0
Le véhicule appartient à la CLASSE 1 > LEGER (Voiture de ville)
```

Figure 3.12 – Affichage des signatures compressées sur la console

3.4.3. Fiabilité de l'algorithme de classification

Le test de notre algorithme de classification s'est déroulé dans les mêmes circonstances (les paramètres) fixés durant les expériences précédentes, c'est à dire le capteur été placé en bord de la route, sur un distance de 1.5m, et Δ a été fixé à 15. Les résultats obtenus après les tests de performances sur des échantillons de 298 véhicules et 614 véhicules sont résumés dans les tableaux 3.6 et 3.7, respectivement:

Classes	Nombre de véhicules	Classifications justes	Fiabilité (%)
C 1 (véhicule léger)	281	275	97.8%
C 2 (véhicule moyen)	15	21	71.4%
C 3 (véhicule lourd)	2	2	100%

Tableau 3.6 : Résultats de classification obtenus pour le premier échantillon.

Classes	Nombre de véhicules	Classifications justes	Fiabilité (%)
C 1 (véhicule léger)	524	560	93.5%
C 2 (véhicule moyen)	76	42	55.3%
C 3 (véhicule lourd)	14	12	85.7%

Tableau 3.7 : Résultats de classification obtenus pour le deuxième échantillon.

Nous pouvons observer que l'algorithme de classification permet de distinguer les véhicules légers et les véhicules lourds avec un niveau de fiabilité dépassant les **90%** pour les deux classes. Cependant, il a été moins efficace pour la classe C2. Ceci est due à la difficulté de distinguer cette class par rapport au deux autres classes adjacentes en utilisant simplement l'amplitude de la signature. D''autre informations tel que la longueur de la signature ou l'utilisation de plusieurs capteurs pour corrélations peut aider à améliorer la fiabilité sur cette classe.

CONCLUSION

Durant ce projet, nous avons étudié dans un premier temps les réseaux de capteurs sans fil et les différentes technologies des systèmes de transport intelligents. Nous avons par la suite présenté en détail notre approche et algorithmes de détection et de classification de véhicules, qui représente le noyau de base pour n'importe quelle application de gestion de trafic routier. Un prototype de détection a été conçu et testé. Les résultats obtenus sont très encourageants en termes de fiabilité de détection avec un taux atteignant les 97%, tandis que les résultats de classification montrent une insuffisance pour classer les véhicules moyens, ceci est dû au fait que l'algorithme de classification était simple et basé sur une seule métrique de décision qui est les niveaux d'amplitudes des signatures magnétiques produites par les véhicules. Les perspectives envisagées de ce projet sont les suivantes :

- L'utilisation d'un magnétomètre plus récent offrant une bande de champ magnétique plus large que celle du magnétomètre «*HMC1002* » que nous avons utilisé, et cela afin d'améliorer les performances de détection.
- D'autre part, notre solution de classification pourrait être améliorée après étude de nouvelles bases d'analyse des signatures et introduction de nouvelles métriques d'aide à la décision, comme par exemple la longueur et la forme des signatures ou bien en créant tout simplement une base de données des signatures enregistrées sur un ensemble de véhicules bien définis avec lesquelles des comparaisons peuvent être faites avant chaque classification.

En fin, ce projet est une première étape de coopération entre le CERIST d'une part et le Ministre du transport BETUR/EMA d'autre part. Le prototype peut être utilisé au moins pour effectuer des comptages au niveau des entrées des villes et même des classifications simples (deux classes), ce qui permettra par exemple d'établir des plans de circulations. Des applications temps réel, ex. gestion automatique des feux de signalisations, routage des véhicules en temps réel, etc. Peuvent être assurés dans le futur et représentent des perspectives concrètes de coopération.

REFERENCES

1. Vamsee K. Boda, AsisNasipuri and Ivan Howitt, "Design Considerations for a Wireless Sensor Network for Locating Parking Spaces", Proceedings of IEEE SoutheastCon2007, March 2007.
2. Taek Mu Kwon and Ryan Weidemann, "Portable Cellular Wireless Mesh Sensor Network for Vehicle Tracking in an Intersection", Research Report, Center for Transportation Studies, University of Minnesota, December 2008.
3. SinemColeri, Sing Yiu Cheung and PravinVaraiya, "Sensor Networks for Monitoring Traffic", Forty-Second Annual Allerton Conference on Communication Control and Computing, U. of Illinois, September 2004.
4. Honeywell, 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002/1021/1022", www.ssec.honeywell.com/magnetic/products.html.
5. Honeywell, "Set/Reset Pulse Circuits for Magnetic Sensors", www.ssec.honeywell.com/magnetic/datasheets/an201.pdf
6. AshishDhar, PurushottamKulkarni. "Using Magnetic Sensors to Estimate Street TrafficPatterns".
7. Sing-Yiu Cheung PravinVaraiya, "Traffic Surveillance by Wireless Sensor." University of California, Berkley, 2007.
8. Guy Pujolle, "Les réseaux;" Edition Eyrolles, 6^{ième} édition, pp122-124. 2008
9. Filtrage Numérique. <http://fr.wikipedia.org/wiki/Filtrenumérique>.
10. Réponse des systèmes numériques, <http://freddy.mudry.org/public/TraitementDuSignal>.
11. Martin Isaksson, "Vehicle Detection using Anisotropic Magnetoresistors," Chalmers University of Technology Goeteborg, Sweden; 2007.
12. EhsanPeymaniGolnazHabibi, "Magnetic position sensor".

ANNEX: Dépenses

<i>Intitulés des postes de dépenses</i>	Dépenses
Frais de séjour scientifique et de déplacement à l'étranger	0
Frais de séjour scientifique et de déplacement en Algérie	16000
Honoraires des enquêteurs	0
Honoraires des guides	0
Frais de travaux et de prestations	0
Matériel informatique + Papeterie et fournitures de bureau	416248
Accessoires et consommables informatiques	341059
Frais de dépôt de Brevet	25400
TOTAL	798707.6