



HAL
open science

Capteurs de position innovants : application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de trajectoires de véhicules

Sébastien Aubin

► To cite this version:

Sébastien Aubin. Capteurs de position innovants : application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de trajectoires de véhicules. Systèmes embarqués. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2009. Français. NNT : 2009INPT055H . tel-04403336v2

HAL Id: tel-04403336

<https://theses.hal.science/tel-04403336v2>

Submitted on 18 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL
open science

Capteurs de position innovants : application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de trajectoires de véhicules

Sébastien Aubin

► **To cite this version:**

Sébastien Aubin. Capteurs de position innovants : application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de trajectoires de véhicules. Autre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2009. Français. NNT: . tel-00484751

HAL Id: tel-00484751

<https://theses.hal.science/tel-00484751>

Submitted on 19 May 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par *l'Institut National Polytechnique de Toulouse*
Discipline ou spécialité : *Micro-onde, Electromagnétisme et Optoélectronique*

Présentée et soutenue par
Sébastien AUBIN

Le 12 décembre 2009

Titre :
*Capteurs de position innovants :
Application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de
trajectoires de véhicules*

JURY

*Dir. de Recherche Jacques EHRlich - Président du Jury
Prof. Christian BOISROBERT - Rapporteur
Prof. Patrick JUNCAR - Rapporteur
Dir. de Recherche Pierre FERDINAND - Examineur
Maître - Assistant François GOULETTE - Examineur
Prof. Thierry BOSCH - Directeur de thèse
Dr. Patrick PLAINCHAULT - Encadrement scientifique*

Ecole doctorale : *GEET*
Unité de recherche : *Laboratoire d'Optoélectronique pour les Systèmes Embarqués*
Directeur(s) de Thèse : *Thierry BOSCH, Patrick PLAINCHAULT*

Rapporteurs : *Prof. Christian BOISROBERT et Prof. Patrick JUNCAR*

*A Mère,
Père,
Soeurette,
Louloutte,
Crapounette,
et à mes Grands-Parents.*

*A tous ceux qui aiment apprendre, concevoir et inventer, je leur dis :
« courage, continuez » !*

Remerciements

Ce travail de doctorat n'est pas uniquement le fruit de mon travail, mais le résultat de la collaboration d'un grand nombre de personnes qui m'ont côtoyé de près - ma famille, mes collègues - ou de loin - simplement avec un bonjour un matin - durant ces quelques dernières années de labeur, mais aussi durant tout mon cheminement. Merci à tous.

Je souhaite poursuivre ces remerciements en exprimant ma gratitude envers ceux qui m'ont permis d'effectuer ces travaux riches en événements et en enseignements, et qui m'ont fait confiance : mon directeur de thèse Thierry BOSCH et mon encadrant Patrick PLAINCHAULT.

Je remercie les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail et m'avoir aidé à l'améliorer. Merci également pour le déplacement un samedi matin pour la soutenance (par ordre alphabétique) : Christian BOISROBERT, Jacques EHRLICH, Pierre FERDINAND, François GOULETTE, Patrick JUNCAR.

Je veux ensuite remercier chaleureusement une personne qui a été comme un troisième encadrant pour moi, et qui m'a transmis quelques infimes morceaux de son immense savoir en particulier dans la modélisation et les lignes de transmission : Guy PLANTIER. J'espère que nous aurons l'occasion de jouer un jour un peu de jazz manouche ensemble !

Je remercie très vigoureusement, à l'image des coups de soleil et des coups de froid récupérés sur le chantier, Patrice BRIAND, le roi des expériences terrains ! Et vive le Brasse Bouillon !

J'ai beaucoup apprécié la collaboration et l'aide fournies par mes différents collègues qu'ils soient de la partie administrative, technique ou professorale. Je n'oublierai pas notamment les longues heures de discussion avec Damien GUITTON, Pierre-Paul HAMERY, Franck JARRY, José THIBAUT pour mettre au point ces *ù\$\$°£ capteurs ! Je n'oublie pas également Maurice FRESNEAU pour ses lumières en physique et Sylvain PERPOIL pour ses coups de main, même à la dernière seconde ! Je remercie mes collègues, notamment ceux qui mettent une ambiance joyeuse grâce à leur bonne humeur (Catherine, Charles, Mireille, Nicolas, vous en faites bien évidemment partie !) et ceux qui manipulent facilement les constructions 3D (n'est-ce pas Eric).

J'ai aussi une pensée vers les anciens doctorants et futurs docteurs, membres ou non de Doc & Co, en particulier, Adil, Ali, Arnaud, Frédéric, Marcelle, Mathias, Mathieu, Mathilde, Nacim, Patrick, Romain, Samyr, Seif-eddine, Tiên, et mon ami de galère : Vincent.

Je remercie les petites mains étudiantes qui m'ont aidé à avancer techniquement sur ce sujet (par date) : Peter, Maël, Pierre, Paul, Haydar, Kawathare.

Je fais un petit clin d'oeil aux petits mots de la langue française qui font que parfois on ne sait plus à quel saint se vouer comme « basé sur », « tel que », « leur », « calibrage est mieux que calibration », « l'accord participe passé des verbes accidentellement pronominaux », « bande de fréquences », « système de mesure », « kilohertz », « ohms », « les règles tordues de l'écriture des chiffres en chiffre et des nombres en chiffre ou en lettre »... Je remercie par ailleurs les différents relecteurs d'une page ou plus (même s'il n'y a pas affinité avec cette thèse) : Annie, Cécile, Christian (le pro), Guillaume et le relecteur-chef depuis que je sais faire des fautes d'orthographe de grammaire et de syntaxe : Michel, ainsi que la relectrice de la langue de Shakespeare : Cristina.

Merci à ceux qui ont contribué à ce que cette thèse se passe bien : repas, moment de détente, réparation de PC (Stéphanie)... J'en profite pour remercier toutes les personnes qui m'ont apporté, m'apportent, ou m'apporteront quelque chose un jour à qui je n'aurais peut être pas dit merci.

Je ne peux oublier dans cette liste ma guitare qui m'accompagne dans mes joies comme dans mes peines depuis quelques années maintenant ainsi que les amoureux de ce merveilleux instrument. Je pense aussi aux fous montés sur 4 petites roues par pied et brandissant leur bâton tordu pour pousser péniblement un palet.

Pour terminer, un grand merci à toute ma famille, même étendue, qui m'entoure. C'est maintenant pour moi une page qui se tourne et le commencement d'un nouveau chapitre.

Résumé

Résumé

Améliorer la sécurité routière passe par une meilleure compréhension des causes d'accidents. Il est donc nécessaire de développer des observatoires discrets pour étudier la manière de conduire de tous les automobilistes. Une partie de cette analyse implique l'utilisation de capteurs mesurant les trajectoires des véhicules sur une portion de route.

Deux capteurs innovants ont été créés pour pallier le manque de capteurs suffisamment précis pour ces travaux de recherche : le premier est un capteur à fibres optiques présentant une succession de réseaux de Bragg et le second, protégé par un brevet, est fondé sur une technologie résistive.

Le premier repère la déformation locale de fibres optiques noyées à moins d'un centimètre sous la surface de la chaussée. Il utilise la variation de longueurs d'onde engendrée par l'extension de la fibre à la zone de contact roue - sol. En utilisant un algorithme adéquat, il est insensible à la température.

Le second est constitué de deux conducteurs dont un est résistif. Le poids du véhicule génère un contact électrique entre les deux conducteurs, transformant la résistance électrique de l'ensemble. Les modèles développés, électrique ainsi que de variation thermique, permettent une meilleure utilisation, notamment dans des conditions où la température varie.

Ces capteurs ont été soumis à une expérimentation sur une route départementale. Etant recouvert d'une résine étanche, ils sont insensibles aux variations d'humidité ou de pluviométrie. L'enfouissement dans la chaussée leur assure un fonctionnement continu. Le capteur optique s'avère plus performant mais coûteux. Le second capteur n'est pas assez robuste mais présente des perspectives intéressantes.

Mots-clés

Réseau de Bragg, capteur résistif, capteur à fibres optiques, observatoire de trajectoires, capteur de position, capteur routier, position latérale, Systèmes de Transport Intelligents (STI).

Title

New position sensors: Application to Intelligent Transport Systems within the context of estimation of vehicle trajectories

Abstract

This action stake is not technology for itself. It is a great help the development of new safety functions, e.g. the estimation of driver's behaviour based upon the vehicle's trajectory. This trajectory is determined via two sensors we developed. This system must not disturb the driver and should therefore remain invisible to him.

The first one is a fiber Bragg grating (FBG) sensor. It detects local strain due to the vehicle weight. The fiber is embedded in the road thanks to resin used in other traffic sensors. The vehicle location is spotted according to the variations of Bragg wavelengths. The fiber extension located under the ground - wheel contact zone changes the step of the Bragg grating.

The second one is based upon two conductors. One of them has a grater electrical resistance. The vehicle's weight creates a link between the two conductors. The resulting electrical resistance provides a lateral position estimation of the vehicle. Electrical and thermic models and simulation even increase the sensor reliability. A caveat is lodged.

Both of them were tested on a secondary road. To put in a nutshell, the FBG sensor gives better results but is very expensive (sensors and interrogator too). The resistance sensor is not much raw nevertheless it has interesting perspectives.

Keywords

Bragg grating, resistance sensor, fiber optic sensor, estimation of vehicle trajectories, position sensor, traffic sensor, lateral position estimation, Intelligent Transport Systems (ITS).

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I Contexte	7
1 L'enjeu dans les transports	9
1.1 Le transport des personnes	9
1.2 Le transport des marchandises	11
1.3 Bilan	11
2 L'accidentologie	13
2.1 Quelques chiffres	13
2.2 Les causes	14
3 Les besoins pour déterminer la localisation d'un véhicule	15
3.1 Objectifs	15
3.2 Méthode	16
3.3 Critères et contraintes	16
4 Les technologies pour le suivi de trajectoire	19
4.1 Vocabulaire associé aux capteurs	19
4.2 La mesure de la trace	21
4.2.1 La vidéo	21
4.2.2 Les technologies hybrides : la fusion de données	22
4.2.3 Bilan de la mesure de la trace	23
4.3 Les systèmes de capteurs non embarqués	24
4.3.1 Les capteurs à contact	24
4.3.1.1 Le capteur pneumatique	24
4.3.1.2 Les capteurs de pesée, WIM	25

TABLE DES MATIÈRES

4.3.1.3	Le capteur résistif	29
4.3.2	Les capteurs actifs sans contact	29
4.3.2.1	Présentation	29
4.3.2.2	La disposition des capteurs	29
4.3.2.3	Le capteur à infrarouge	31
4.3.2.4	Le capteur à ultrasons	31
4.3.2.5	Le radar : capteur à micro-ondes	32
4.3.3	Les capteurs passifs sans contact	33
4.3.3.1	Les capteurs passifs à infrarouge	33
4.3.3.2	Les capteurs magnétiques	33
4.3.3.3	Les boucles électromagnétiques	34
4.3.3.4	Le capteur phonique	36
4.4	Les systèmes de capteurs embarqués	37
4.4.1	Les capteurs proprioceptifs	37
4.4.1.1	Les capteurs actifs à ondes	37
4.4.1.2	L'odomètre et le tachymètre	38
4.4.1.3	Le gyromètre	39
4.4.1.4	La centrale inertielle	40
4.4.2	Les capteurs extéroceptifs	40
4.4.2.1	Les aimants et le magnétomètre	41
4.4.2.2	Le filoguidage	41
4.4.2.3	L'identification par radiofréquence	42
4.4.2.4	Les balises actives	43
4.4.2.5	Les repères passifs	44
4.4.2.6	L'utilisation d'un modèle	45
4.4.2.7	L'utilisation des téléphones portables	45
5	Bilan	47
Chapitre II	Capteurs de position innovants	53
6	Présentation	55
6.1	Objectifs	55
6.2	Généralités sur les systèmes d'acquisition	56
7	Le capteur à réseaux de Bragg	57
7.1	Les capteurs à fibre optique	57
7.1.1	Définition	57

7.1.2	La récupération de l'information	57
7.1.3	Les avantages et inconvénients des capteurs à fibre optique	58
7.1.4	Les techniques de mesure	58
7.1.5	Les réseaux de capteurs optiques	58
7.2	Le réseau de Bragg	59
7.2.1	Le principe	59
7.2.2	Le réseau de diffraction	60
7.2.3	Du réseau de diffraction au réseau de Bragg	61
7.2.4	La fabrication d'un réseau de Bragg	62
7.2.5	La réflexion du réseau de Bragg	62
7.2.6	Les spécifications d'un réseau	64
7.2.7	La modélisation des réseaux	64
7.2.8	Le réseau de Bragg comme transducteur	65
7.2.9	L'interrogation d'un réseau de Bragg	66
7.2.9.1	Les techniques de séparation des longueurs d'onde en amont	66
7.2.9.2	Les techniques de séparation des longueurs d'onde en aval	66
7.2.9.3	Bilan des techniques d'interrogation d'un réseau de Bragg	67
7.3	Les capteurs à réseaux de Bragg	67
7.4	Un capteur à réseaux de Bragg innovant	70
7.4.1	Objectifs	70
7.4.2	Principe	70
7.4.3	La précision sur la mesure	72
7.4.4	Le capteur testé	72
7.4.5	Le choix de l'interrogation des réseaux	74
7.4.6	La construction du capteur	75
7.4.7	Les valeurs théoriques attendues	76
7.4.8	L'influence du processus d'adjonction de la résine sur les réseaux de Bragg	79
7.5	Bilan du capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg	82
8	Le capteur résistif innovant	85
8.1	Description	85
8.2	Le système d'acquisition et de conditionnement	87
8.3	La linéarité du capteur	88
8.4	La modélisation du capteur	91
8.4.1	Présentation	91
8.4.2	Les caractéristiques techniques du capteur	91

TABLE DES MATIÈRES

8.4.3	La modélisation par une ligne de transmission à constantes localisées	92
8.4.3.1	Les caractéristiques du modèle	92
8.4.3.2	La valeur de la résistance	93
8.4.3.3	La valeur de l'inductance	94
8.4.3.4	La valeur de la capacité	95
8.4.3.5	Bilan	96
8.4.4	La modélisation par une ligne de transmission à constantes uniformément réparties	97
8.4.5	Le temps de propagation	102
8.4.6	Le modèle électrique équivalent	104
8.4.7	Bilan	105
8.5	L'influence de la température	106
8.5.1	Présentation	106
8.5.2	L'influence de la température sur le capteur	106
8.5.3	L'influence de la température sur le système d'acquisition seul	109
8.5.4	L'influence simultanée de la température sur l'électronique et le capteur	111
8.6	Le temps de réponse mécanique	114
8.7	Bilan du capteur résistif	115
 Chapitre III Expérimentation sur la route départementale 961		117
 9 Présentation		119
9.1	Objectifs	119
9.2	Le conditionnement et l'intégration des capteurs dans la chaussée	120
9.2.1	Le conditionnement des capteurs optiques	120
9.2.2	Le conditionnement des capteurs résistifs	121
9.2.3	L'installation des capteurs dans la chaussée	121
9.3	Schéma général des expérimentations	122
9.4	Les véhicules de test	123
 10 Expérimentation des capteurs à réseaux de Bragg		125
10.1	Présentation	125
10.2	Les mesures statiques	125
10.2.1	Acquisition des longueurs d'onde de référence	125
10.2.2	Le véhicule à l'arrêt sur le CFO n°1	126
10.2.3	Les remarques sur cette première expérience	127
10.2.4	Le véhicule à l'arrêt sur le CFO n°2	129

10.2.5 Bilan	131
10.3 Les mesures en dynamique à faible vitesse	131
10.4 Les effets du passage du camion de référence du LRPC sur les CFO	134
10.4.1 Les effets du passage du camion sur les capteurs suivant des positions latérales différentes sur la chaussée	136
10.4.1.1 Les effets de l'essieu avant sur le capteur optique	136
10.4.1.2 Les effets de l'essieu arrière sur le capteur optique	140
10.4.1.3 Bilan	144
10.4.2 Les effets du passage du camion en fonction de la vitesse	145
10.4.2.1 Les effets de l'essieu avant sur le capteur optique	145
10.4.2.2 Les effets de l'essieu arrière sur le capteur optique	145
10.4.2.3 Bilan	146
10.5 Bilan	147
11 Expérimentation des capteurs résistifs innovants	149
11.1 Les tests en laboratoire	149
11.2 Influence de l'angle d'attaque sur le capteur	153
11.3 L'expérimentation sur une route départementale	156
11.3.1 Les tests préalables	156
11.3.2 Le recueil des données	157
11.3.3 Les résultats	158
11.4 Le capteur résistif amélioré	159
11.5 Bilan	161
Conclusion	163
12 Bilan	165
13 Perspectives	169
Annexes	173
A La fibre optique	175
A.1 Historique	175
A.2 Propriétés de la fibre	177
A.2.1 L'atténuation	178
A.2.2 La dispersion chromatique	178
A.2.3 La dispersion de polarisation	178

TABLE DES MATIÈRES

A.2.4	Les principaux effets non linéaires : l'automodulation de phase, l'effet Raman et l'effet Brillouin	178
A.3	Les différents connecteurs	179
A.3.1	Les propriétés physiques	179
A.3.2	Les propriétés optiques	179
A.3.2.1	Les pertes par insertion	179
A.3.2.2	Les pertes par réflexion	179
A.4	L'impact de la non linéarité de la fibre	180
A.5	Les avantages et les inconvénients de la fibre	180
B	Techniques de séparation des longueurs d'onde en aval	181
B.1	Généralités sur les techniques de séparation des longueurs d'onde	181
B.2	Les appareils à prisme	182
B.3	Les filtres passifs	184
B.4	Les appareils interférentiels	184
B.5	Les filtres actifs	187
B.6	Les réseaux de diffraction	188
C	Spécification de la norme Française E 03-001	189
D	Complément d'illustration des mesures acquises sur les capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg	191
D.1	Les mesures en dynamique à vitesse réelle	191
D.2	Vues d'ensemble de graphiques complémentaires suite au passage du camion du LRPC sur le capteur	194
D.3	Quelques mesures obtenues par l'action de l'essieu avant du camion de référence lors du 5 ^e passage	200
D.4	Quelques mesures obtenues par l'action de l'essieu arrière du camion de référence lors du 5 ^e passage	203
E	Photos des expérimentations sur le site de Marans (49)	207
F	Publications	215
F.1	Les brevets	215
F.2	Les revues	215
F.3	Les conférences avec Actes	215
F.4	Les communications orales	216
F.4.1	Les affiches	216
F.4.2	Les séminaires	216

Table des figures	226
Liste des tableaux	228
Bibliographie	238
Acronymes	239

Introduction générale

Le vingtième siècle a connu un très fort développement dans les transports, en particulier dans les transports terrestres et aériens. L'acquisition de l'automobile dans les foyers et chez les professionnels, l'augmentation des transports de marchandises par poids lourd ainsi que le développement des transports en commun engendrent un fort trafic, et ce quel que soit le pays. De plus l'urbanisation, la concentration des populations dans les villes et l'accroissement de la mobilité des personnes facilitent la congestion du trafic. Il y a plusieurs années de cela, les autorités - à l'origine principalement anglaises et américaines - ont commencé à chercher des solutions à ce problème. Le concept de « systèmes de transport intelligent » est né.

En réalité, dans les années 90, les premiers programmes de recherche¹ montrent que toutes les formes de transport sont susceptibles de bénéficier de l'application des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Pour différencier les TIC appliquées au domaine du transport, le terme de *Intelligent Transport Systems (ITS)* autrement dit Systèmes de Transport Intelligents (STI) est créé, intégrant le développement, l'exploitation et la gestion du réseau de transport. Ce terme englobe également la gestion du trafic routier (y compris les piétons et bicyclettes), la sécurité routière, mais aussi la gestion des secours en cas d'accident. Ces systèmes rendent le transport plus fiable, plus écologique, plus sûr, plus efficace et plus économique. Le déploiement de ces services doit servir par la suite à tous les usagers et aux gestionnaires (les Conseils généraux, les Directions Départementales de l'Équipement...). Pour les véhicules, il s'agit d'aide à la conduite, de systèmes anti-collision et d'alertes. Un véhicule se définit comme un engin mobile qui permet de déplacer des personnes ou des charges d'un point à un autre. La gestion du trafic - contrôle et surveillance - à but commercial ou non, mais également la gestion des parkings, des routes, des secours, des accidents, des incidents, de la prévention des accidents et de l'information aux voyageurs constituent autant d'apports à l'infrastructure.

Trois principales organisations coordonnent la promotion des ITS :

- ERTICO en Europe (European Road Telematic Implementation Coordination Organisation), société coopérative de droit belge parfois appelée «ITS Europe». Elle rassemble des industriels, des exploitants et des représentants de pouvoirs publics provenant de différents états de l'Union Européenne [ERTICO, 2009] ;

1. Les premiers programmes de recherche ont notamment vu le jour aux Etats-Unis avec les Systèmes Autoroutiers Intelligents pour Véhicules (*Intelligent Vehicle Highway Systems ou IVHS*)

TABLE DES MATIÈRES

- ITS America aux Etats-Unis, société éducative à but non lucratif, fondée par des industriels, des universités et le gouvernement des Etats-Unis (plus particulièrement le DOT : Department of Transportation) [[America, 2009](#)];
- VERTIS (ITS Japan) au Japon, coopération entre les industriels et les pouvoirs publics, souvent considérée comme ITS Asia-Pacifique [[VERTIS, 2009](#)].

Cependant ces organisations à dominante continentale ne répondent ni aux besoins des autorités régionales et locales, ni aux besoins des petites et moyennes entreprises. De nombreux pays ont créé leur propre organisation nationale ITS. Ainsi, nous avons en France : ITS France. Les organisations continentales fédèrent les ITS nationaux.

De par leur définition, les ITS apparaissent comme des systèmes dont la recherche est fondée sur la technologie. Cependant, il faut rappeler qu'ils ont été développés pour l'Homme car il n'en reste pas moins l'utilisateur final. Cette notion a longtemps été sous estimée rendant les systèmes développés inutilisables. Par ailleurs, les facteurs humains apportent un complément d'information pour analyser des situations de façon à perfectionner les systèmes existants. De fait, les sciences humaines prennent de plus en plus d'importance dans les ITS.

Les projets dans les ITS fleurissent tant au niveau national qu'international. La collaboration du secteur privé et du secteur public est nécessaire pour aboutir à un résultat. Ce secteur public est constitué de laboratoires de recherche mais également des administrations et des collectivités, qui, en tant que responsables et gestionnaires de routes, désirent tester les solutions les plus efficaces. En France, huit pôles de compétitivité² travaillent dans ce domaine (sur les 71 en juillet 2007) : IDforCAR (anciennement le pôle Automobile haut de gamme), I-Trans, Lyon Urban Truck & Bus, Mer Bretagne, Mer Paca, Mobilité et transports avancés, Mov'eo, Véhicule du futur [[DIACT et le Ministère de l'Economie des Finances et de l'Emploi, 2007](#)].

Les grands projets nationaux en cours ne sont pas tous inclus dans un pôle de compétitivité en raison de leur récente création et la présence d'organismes spécifiques qui financent ces projets. Quelques uns de ces projets sont énumérés ci-dessous :

- **DIVA** : gestion dynamique des échanges d'informations de sécurité entre les véhicules et l'infrastructure pour avertir le conducteur de divers dangers ;
- **LAVIA** : système d'assistance à la conduite destiné à aider le conducteur à mieux respecter les vitesses réglementaires ;
- **SARI** : information du conducteur d'une réelle difficulté imminente peu ou mal perceptible ;
- **Trucks** : étude de l'influence des risques liés aux poids lourds pour mesurer leur impact sur les infrastructures et l'environnement afin d'améliorer la sécurité du trafic.

Sur le plan européen, les grands projets courants sont :

- **AIDE** : une aide à la conduite tenant compte du trafic, de l'état du véhicule et de la situation de conduite du conducteur. Un exemple : s'il double une voiture et qu'un appel

2. Ils regroupent, sur un territoire donné, des entreprises, des centres de recherches publics ou privés et des centres de formation dans le but de favoriser l'émergence des activités à forte visibilité internationale.

-
- arrive sur son téléphone, le système met en attente l'appel jusqu'à ce que l'automobiliste soit plus apte à répondre ;
- **CVIS** : coopération de l'infrastructure et du véhicule pour donner des informations aux conducteurs ;
 - **FeedMAP** : projet sur l'amélioration des mises à jour des cartes routières ;
 - **HeavyRoute** : amélioration des transports de marchandises à partir d'une carte tenant compte de l'état des routes, du trafic... ;
 - **PReVent** : un autre système d'aide à la conduite pour alerter les usagers de la route (les automobilistes mais également les piétons et les cyclistes) d'un accident ;
 - **ROSATTE** : création d'une base de données européenne sur les routes incluant des informations telles que des éléments de la signalisation verticale (limitation de vitesse par exemple). Cette base pourra par la suite être utilisée par des systèmes d'aide à la conduite ;
 - **SafeSpot** : une aide à la conduite s'appuyant des données venant de l'infrastructure et du véhicule.

Ces listes sont bien sûr non exhaustives.

L'acronyme d'ITS contient le mot « intelligence » lequel désigne la partie communication d'une information traitée par un système coopératif. Cette terminologie est également utilisée dans les termes suivants : « route intelligente » (parfois dénommée « route du futur ») et « véhicule intelligent ». Ces routes et véhicules coopératifs visent à limiter les risques provenant d'erreurs humaines. Ces dernières sont considérées comme plus significatives que les erreurs dues à une défaillance mécanique ou à une défaillance de l'automatisme.

Les Systèmes Avancés d'Aide à la Conduite (nommés également *Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)*) peuvent constituer une solution. Les ADAS intègrent trois éléments : la perception du véhicule y compris sa localisation, le traitement des informations selon le contexte (risque de collision...) et l'action (information au conducteur, freinage automatique...). Pour le conducteur, ce genre de solution est moins abrupte que l'automatisation complète de la conduite. Ces véhicules se déplaçant de manière autonome dans un environnement se développent. Pour preuve, l'Europe démarre des projets comme CyberCar et CyberMove, les Etats-Unis lancent des concours tel que le troisième concours organisé par la Darpa (agence de recherche militaire américaine) [DARPA, 2008]. Lors des premières éditions de ce concours, les véhicules autonomes devaient traverser un désert. La première année, en 2004, aucun participant n'a terminé la course. La deuxième année, en 2005, cinq véhicules ont franchi la ligne d'arrivée ! Désormais, les véhicules roulent sur une piste présentant différentes signalisations (feux, stop...) et incluant un faible trafic. Onze véhicules participent à la phase finale sur ce circuit considéré comme urbain.

La recherche actuelle en matière d'ITS progresse toujours selon deux tendances :

- d'une part, la communication de messages aux conducteurs s'améliore. L'information transmise par l'infrastructure porte sur une difficulté à venir, telle que les conditions météorologiques, une route de mauvaise qualité, une mauvaise visibilité ou lisibilité, une vitesse mal adaptée pour franchir un virage ;

- d'autre part, le guidage automatique des véhicules s'effectue avec ou sans l'aide de capteurs installés sur l'infrastructure.

Quel que soit l'ITS, la communication est omniprésente. Voici le schéma de communication établi en regard de ces systèmes (figure 1).

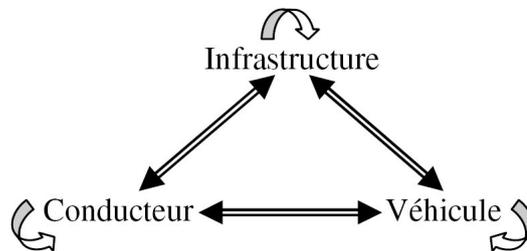


FIGURE 1 – Présentation des échanges dans les ITS.

Chaque élément de ce triangle peut communiquer avec un autre élément (\Leftrightarrow), avec lui-même voire avec un élément du même type (flèche circulaire). La situation des différents éléments est donnée par des capteurs. Ces derniers représentent le premier composant d'un ITS.

Un **capteur** est un système permettant de transformer une grandeur physique en une information utilisable et représentative de cette information [Asch *et al.*, 1998]. Les progrès de la physique nous permettent aujourd'hui de fabriquer certains capteurs d'une taille nanométrique. Chaque individu rencontre dans son quotidien des capteurs, éléments indispensables de notre société.

Le concept de « capteur intelligent » enrichit la notion de « capteur ». Un « capteur intelligent » fonctionne comme un capteur. L'intégration d'une unité de calcul, assurée par un circuit programmable, lui confère cette « intelligence ». Ce système est capable d'effectuer un traitement numérique de la donnée. Son information de sortie tient compte de certaines dérives et de certains réglages. L'information transite vers d'autres organes du système, il est donc capable de **communiquer**. Cette notion de communication est fondamentale pour ce capteur. L'ensemble des blocs est alimenté voire auto-alimenté. Ces éléments sont illustrés sur la figure 2.

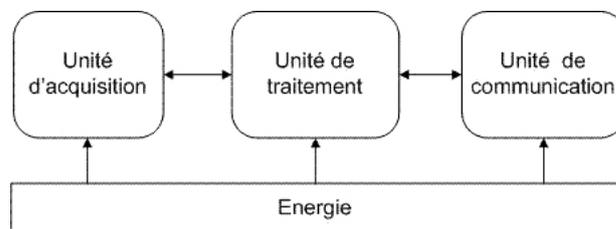


FIGURE 2 – Les différentes unités d'un capteur intelligent.

L'intelligence, dans son sens littéraire, désigne la faculté de comprendre, de découvrir et de créer des relations entre les faits et les choses. Dans ce champ d'application, cette définition n'est pas applicable. Les capteurs analogiques sont classés comme non intelligent.

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre de l'équipe de recherche TRANSformations de Modèles pour l'Embarqué (TRAME) du Centre d'Etude et de Recherche (CER) de l'ESEO (grande école d'ingénieurs généralistes dans le Maine-Et-Loire) et du Laboratoire d'Optoélectronique pour les Systèmes Embarqués (LOSE) de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications (ENSSEIHT) dans le département de Haute-Garonne. L'équipe TRAME développe deux thématiques : l'une porte sur la compréhension et la définition de la notion de plates-formes technologiques ou PDM (Platform Description Model) pour les systèmes ; l'autre repose sur le développement de systèmes de **capteurs « intelligents »** (ou smart sensor).

Le projet Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires (SARI) s'inscrit dans le cadre d'une action concertée du Programme de Recherche et Développement pour l'Innovation et la Technologie dans les Transports Terrestres (PREDIT) n°3. Il cherche à réduire le nombre d'accidents en étudiant le conducteur et son environnement afin de l'aider lorsqu'une difficulté est détectée comme peu ou mal perceptible. Il comporte quatre thèmes dont celui intitulé « Vision Intelligente de Zones et Itinéraires à Risques (VIZIR) » dans lequel nous nous sommes investis. Les travaux du thème VIZIR étudient la modification de la perception du conducteur sur des situations routières interurbaines.

Dans ce contexte, il est nécessaire de concevoir un observatoire de trajectoires pour suivre, plus particulièrement, les positions latérales et longitudinales, c'est-à-dire suivant la largeur et la longueur de la route, ainsi que les vitesses des différents véhicules circulant sur une section de route donnée. L'identification des positions des différents usagers dans l'environnement permet de prédire, d'analyser et de constater les situations de conduite des usagers. La mesure de la position du véhicule est recherchée avec une erreur de mesure donnée au centimètre. La vitesse, quant à elle, est mesurée à cinq kilomètres par heure. Ce dispositif doit être discret pour le conducteur et conçu pour une installation sur le réseau routier français. Son fonctionnement est prévu sans interruption de service et ce quelles que soient les variations météorologiques. Par ailleurs, une attention doit être portée à son coût et à sa consommation d'énergie. Ce système doit être autonome et conçu pour transmettre automatiquement l'ensemble des données au sein de notre laboratoire.

Nous présenterons dans le premier chapitre un outil qui nous aidera à mieux comprendre l'attitude des conducteurs face à leur environnement. La localisation du véhicule fournit une base pour cette étude. L'outil contient donc des capteurs qui restituent au moins une information concernant la vitesse et la position du véhicule sur la chaussée. L'adjonction de capteurs répartis permet d'échantillonner la trajectoire des véhicules. Il reste ensuite à choisir les capteurs adéquats. Pour cela, un panorama des différents capteurs utilisables actuellement sera établi.

Les systèmes sur le marché ne satisfaisant pas nos besoins, deux capteurs innovants ont été conçus et testés. Ils seront décrits au sein du deuxième chapitre. Le premier est fondé sur une technologie de fibres optiques à réseaux de Bragg. Le second est un capteur résistif. La compréhension du fonctionnement du capteur engendre une meilleure prévision de ses réactions dans une configuration expérimentale. Elle passe par une modélisation, c'est-à-dire une reproduction

TABLE DES MATIÈRES

artificielle du phénomène ou du système étudié afin d'observer ce qui se passerait en réalité dans le cas d'actions analogues. La conception d'un modèle disponible à la simulation favorise l'approfondissement de la technologie utilisée. Un modèle électrique du capteur résistif a été étudié ainsi qu'un modèle d'évolution en température.

Cependant, l'aboutissement de ce travail ne peut être satisfaisant et valorisant qu'à condition de démontrer dans la pratique la viabilité de ces deux capteurs. Pour satisfaire cette condition, un tronçon de la route départementale 961 entre Marans et Segré - dans le Maine-et-Loire (49) - a été équipé de ces capteurs. Ce déploiement s'inscrit dans le cadre du projet SARI [Algarra, 2006]. Ces résultats seront présentés dans le troisième chapitre.

Outre un bilan, la conclusion comporte également des pistes pour poursuivre ce travail.

Chapitre I

Contexte

1.

L'enjeu dans les transports

La notion de route est très ancienne. Moïse évoque dans l'Ancien Testament une « voie royale » aboutissant à la capitale des Amorrites. Mais ces routes restent pendant longtemps de simples sentiers naturels ou façonnés par le passage des Hommes. Certaines d'entre elles sont pavées ou recouvertes de pierres tassées. Elles se développent surtout avec le début du commerce. Le réseau routier actuel commence à apparaître dans notre pays au début du XVIII^e siècle avec la création d'une administration autonome « des Ponts et Chaussées ». Cependant, jusqu'au XVIII^e-XIX^e siècle, les transports commerciaux ou des personnes étaient surtout fluviaux ou maritimes. A la fin du XIX^e siècle, la France et le Royaume-Uni possédaient les meilleurs et les plus longs réseaux routiers du monde, à savoir 37 000 km de routes nationales pour la France [Hachette, 2008]. C'est également le début de tracés décidés par l'Homme et non par la nature. Le développement de l'automobile a permis l'essor de routes toujours plus praticables, droites et fiables. L'entretien et le développement de ce réseau exigent de lourds investissements sur du long terme.

Le concept du transport implique l'usage de véhicules et de voies de communication (routes, voies ferrées, canaux...). Selon l'Agence internationale de l'énergie, entre 2000 et 2030, la croissance annuelle de la demande dans les transports devrait atteindre 2,4 % pour les véhicules et 2,1 % pour les voies de communication [Billard, 2008]. Le monde actuel est un monde en mouvement avec des déplacements de flux humain et matériel conséquents.

1.1 Le transport des personnes

Le transport de personnes se différencie en deux catégories :

- le transport à des fins personnelles, à l'instar des raisons familiales (visite à la famille, amis, célébration...) ou d'agrément (salon, foire, exposition, tourisme, vacances...), etc. ;

- le transport à des fins professionnelles, à savoir des réunions, des déplacements domicile-travail, des formations, etc.

La voiture est un bien présent dans beaucoup de ménage ; 82 % de la population française était motorisée en 2006. A cette même date, 72,5 % de l'ensemble des déplacements longues distances¹ se faisait en voiture, 15 % par le train et 6,3 % par l'avion. D'une manière générale, la voiture est le moyen de transport privilégié des Français avec une part de 48 % des kilomètres parcourus sur l'ensemble des déplacements et un parc automobile de 31 millions de véhicules au 1^{er} janvier 2007. L'avion arrive en deuxième position avec 34,4 % (SOCIÉTÉ FRANÇAISE D'ENQUÊTES PAR SONDAGES (SOFRES), calculs Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS)-Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE) et Service Economie, Statistiques et Prospective (SESP)).

En 2006, les Français, âgés de quinze ans ou plus, ont effectué plus de 226 millions de voyages² à longue distance allers-retours et ont parcouru 224 milliards de kilomètres. Le transport collectif est favorisé pour les déplacements professionnels [NPDC, 2007].

Depuis les années 70, la qualité de vie dans les villes a diminué, en partie avec la politique du « tout-voiture ». Avec en moyenne 80 % de la population urbaine dans les pays européens, il s'agit pour l'avenir de :

- prendre en compte l'évolution de la demande dans les moyens de transport (personnes, marchandises), notamment en considérant le vieillissement de la population ;
- permettre la coexistence du transport des passagers et des marchandises (le plus souvent des colis de petite taille en ville) ;
- décongestionner les axes de transport.

Afin de sortir les centres-villes du « tout-voiture » et de décongestionner les accès aux grandes métropoles, les villes améliorent les services de transport urbain ou périurbain collectifs ou semi collectifs. Le développement de parkings à la périphérie des villes permet d'arriver en centre-ville en utilisant les transports en commun. Cependant, la demande de transport requiert souvent un service de type porte-à-porte, lequel n'est pas toujours intégré de façon optimale aux différents systèmes de transport.

Par ailleurs un vide subsiste dans les transports en commun pour un déplacement de proximité de faible capacité. Une partie de la réponse est donnée par le développement des vélos en libre service dans les villes, à l'instar du « vélib » de Paris. Ce type de service est de plus en plus demandé mais reste réservé à une certaine partie de la population. En effet, cette solution n'est pas viable pour les personnes handicapées ou à mobilité réduite. Une assistance est nécessaire dans ce cas.

1. Le déplacement longue distance est défini conformément à la convention préconisée par Eurostat, l'office statistique des Communautés Européennes par un déplacement pour lequel la personne enquêtée s'est éloignée de son domicile d'une distance supérieure à environ 100 km, quel que soit le moyen de transport utilisé.

2. Le voyage est défini ici avec au moins une nuit passée en dehors du domicile.

1.2 Le transport des marchandises

Le transport routier métropolitain des marchandises a connu une augmentation soutenue entre 1980 et 2004. Il a été multiplié par trois durant cette période, passant de 98,1 à 295,6 en milliards de tonnes kilomètres. Le tonnage transporté évolue peu. En revanche, les distances s'allongent. L'augmentation de la valeur des marchandises par unité de poids a stimulé la croissance du fret aérien. L'ensemble du transport des marchandises a évolué de manière moins conséquente : de 208,4 à 368,5 milliards de tonnes-kilomètres [SESP, 2008].

En 2005, le flux routier achemine 81 % des trafics terrestres intérieurs. 71 % de ces flux sont assurés sous pavillon français.

1.3 Bilan

Un milliard de kilomètres de route équipe le paysage français dont la répartition est la suivante (estimation 2006 de l'USIRF [USIRF, 2008]) :

- autoroutes : 11 000 km avec une circulation routière tous véhicules confondus de 125 milliards de véhicules kilomètres³ ;
- routes nationales : 9 000 km avec 96 milliards de véhicules kilomètres ;
- routes départementales : 384 000 km avec 194 milliards de véhicules kilomètres ;
- voies communales : 604 000 km.

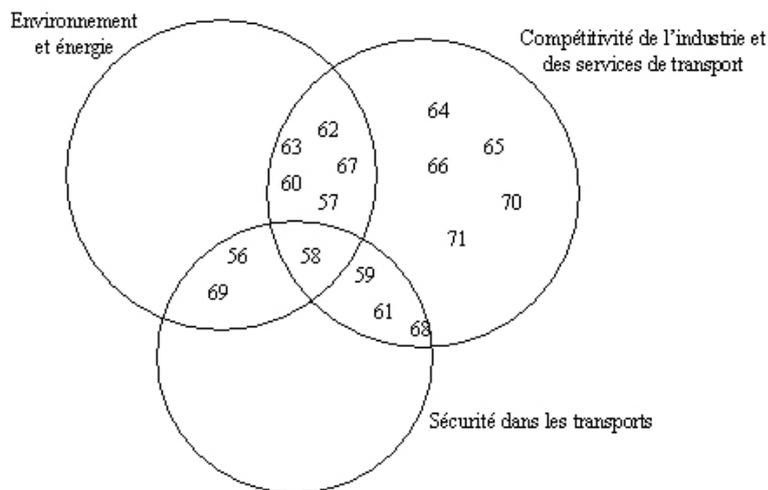
La circulation routière, tous véhicules confondus, représente environ 141 milliards de véhicules * kilomètres pour les agglomérations supérieures à 5 000 habitants [SESP, 2008]. Sur le réseau des routes nationales, les poids lourds représentent 15 % du trafic. L'encombrement des autoroutes et des routes nationales montre l'importance d'une bonne gestion du trafic.

L'avenir des différents modes de transport réside en :

- une réduction drastique de facteurs sociaux et environnementaux tels que les accidents, le bruit, la pollution locale, la congestion de la circulation, la consommation de surfaces cultivables, la consommation d'énergie et l'émission de gaz à effet de serre, sans oublier les coûts qui en découlent ;
- une amélioration de la qualité du service rendu (temps de parcours, ponctualité, conditions de transports, suivi et traçabilité, ...) ;
- une amélioration des systèmes de transports pour les rendre résistants aux actes de malveillance et de terrorisme ;
- une optimisation des coûts (gestion, logistique...).

3. Le véhicule kilomètre est une unité de mesure correspondant au mouvement d'un véhicule routier automobile sur un kilomètre. Un employé habitant à 7 km de son travail et revenant déjeuner chez lui à midi, se déplaçant seul, en voiture. Chaque jour l'ensemble de ses déplacements entre son domicile et son lieu de travail représente donc : $4 \times 7 = 28$ véhicules-kilomètres.

Cet avenir s'améliore à condition de poursuivre les progrès dans les domaines de l'environnement, de l'énergie, de la compétitivité de l'industrie et des services de transport ainsi que de la sécurité dans les transports (figure 1.1).



56	Architecture et matériaux pour infrastructures de transport terrestre	64	Acoustique des véhicules
57	Travaux d'infrastructures	65	Architecture électrique des véhicules
58	Infrastructures routières intelligentes	66	Architecture électronique des véhicules
59	Sécurité active des véhicules	67	Gestion de l'énergie à bord des véhicules
60	Architecture et matériaux pour l'allègement des véhicules	68	Liaisons de données véhicule infrastructure
61	Sécurité passive des véhicules	69	Systèmes aériens automatisés
62	Moteurs à pistons	70	Positionnement et horodatage précis
63	Turbomachines	71	Gestion des flux de véhicules

FIGURE 1.1 – Les grands enjeux.

A ces enjeux s'ajoutent différents services associés aux transports [DGE, 2006] :

- le service logistique permet de donner une information sur le trafic, une aide aux voyages, et la possibilité de connaître l'état d'acheminement d'une livraison... ;
- la location de véhicules propose une réponse aux besoins changeants des ménages à savoir posséder une petite voiture pour se rendre sur le lieu de travail et en louer une plus spacieuse pour partir en vacances ;
- les artisans sont demandeurs de formations principalement en électronique pour l'entretien des véhicules de demain.

La réponse à ces enjeux nécessite d'innover aussi bien sur les véhicules, y compris leurs sous-ensembles comme la propulsion, que sur l'organisation générale des systèmes des transports. Ces innovations sont attendues à la fois sur le plan technique et en terme d'organisation.

2.

L'accidentologie

2.1 Quelques chiffres

L'augmentation de la circulation des biens et des personnes n'est pas sans risque. Bien que nos véhicules soient de plus en plus sûrs et que l'ingénierie de la circulation ait progressé, le nombre d'accidents sur les routes reste conséquent. En 2007, il a été dénombré 4 838 tués¹ pour la France entière² [Chapelon, 2008b]. Ce bilan indique par ailleurs 83 850 accidents corporels et 106 709 blessés dont 39 754 blessés hospitalisés. La France métropolitaine comptabilise 4 620 tués à trente jours, 81 272 accidents corporels, 103 201 blessés dont 38 615 blessés hospitalisés. Cela représente 13 personnes tuées et 300 personnes blessées chaque jour. Un accident mortel du travail sur deux est un accident de la route. Il est également important de souligner que le coût de l'insécurité routière est estimé à 24,70 milliards d'euros pour 2008 en France, ce qui représente un baisse de 3 % par rapport à l'année 2007 [ONISR, 2008]. L'Etat investit environ un dixième de cette somme afin de limiter ces coûts. **Découvrir les causes des accidents de la route est bien un enjeu d'actualité.**

D'une manière globale, depuis plus de 30 ans, l'accidentologie sur les routes de France diminue. Elle résulte d'un changement de comportement du conducteur, fortement incité par les pouvoirs publics. Les accidents ne sont pas homogènes sur le réseau routier français. Les autoroutes sont les routes les plus sûres de France à l'inverse des routes secondaires, c'est-à-dire routes départementales et communales [Chapelon, 2005].

Sur le plan européen, la France ne présente pas de résultat satisfaisant. En considérant le nombre de personnes tuées sur les routes en 2006, elle se situe à la 9^e place sur les 25 pays de l'Union Européenne : 76,5 personnes / million d'habitants en France contre 44,4 personnes par

1. Un délai maximum de trente jours est observé entre l'accident et la mort de la personne pour que ce décès soit pris en compte dans les statistiques du nombre de tués sur la route.

2. Métropole et départements d'outre-mer [Guadeloupe, Guyane, Martinique et Réunion] inclus.

million d'habitants pour le premier, les Pays-Bas [ONISR, 2009]. La France est située au même rang européen sur l'échelle comprenant le nombre de tués par milliard de kilomètres parcourus.

2.2 Les causes

Neufs facteurs ont été mis en évidence et évalués de manière crédible (données de 2006) [Chapelon, 2008a]. L'alcool (26 %), la ceinture de sécurité (9 %), le téléphone portable (7,5 %), les feux de jour (5,5 %), le cannabis (2,5 %), la fatigue et la somnolence (2,8 %) sont des facteurs qui dépendent uniquement du conducteur. Les arbres (7,5 %, poteaux inclus) et la séparation des sens de circulation (de l'ordre de 5 % pour les 10 % des voies les plus empruntées les plus circulés) sont des facteurs liés à l'infrastructure. La vitesse (20 %), quant-à elle relève à la fois de l'utilisateur et de l'infrastructure. Cependant, l'accident à un seul véhicule sans piéton correspondant à une sortie de chaussée reste le type d'accident le plus fréquent (20 % des accidents corporels) et le plus dangereux (37 % des tués).

Il est vrai que les pouvoirs publics cherchent à réduire le nombre de morts sur les routes. La population est sensible à ces relevés relatés dans la presse, même si les accidents isolés sont devenus, à tort, une banalité dans le paysage des Français. Mais si les institutions s'inquiètent de ces chiffres, c'est aussi dû à une réalité économique. Comme évoqué précédemment, un accident coûte très cher. Ces dépenses se classent en trois catégories [Glaser, 2004] :

- **Coûts marchands directs** : frais médicaux, sociaux, matériels et administratifs ;
- **Coûts marchands indirects** : pertes futures de production et de vente ;
- **Coûts non-marchands** : flux gérés par les compagnies d'assurances.

Une étude récente a montré que les accidents de la route provoquent presque autant de blessés avec un handicap majeur que de morts. D'après cette même étude, le nombre de blessés est en réalité trois fois plus important que celui donné par le gouvernement [Amoros, 2007].

Le nombre de personnes tuées a diminué grâce à différentes mesures qui ont eu un effet immédiat (comme le port obligatoire de la ceinture, du casque, les limitations de vitesse...) ou à plus long terme (conduite accompagnée, campagnes médiatiques de prévention...). Depuis 2001, le Conseil National de la Sécurité Routière (CNSR) est en charge de proposer des mesures afin d'améliorer la sécurité routière, d'évaluer les différentes actions engagées et de commander des études élargissant les connaissances dans le domaine de la sécurité routière.

3.

Les besoins pour déterminer la localisation d'un véhicule

3.1 Objectifs

Suite aux précédentes remarques, plusieurs axes de travail se dégagent pour réduire les accidents :

- agir sur le conducteur ;
- agir sur le véhicule ;
- agir sur l'infrastructure.

Comme le montre la figure 1 page 4, un échange a lieu entre ces différents éléments. Dans le cas de notre étude, nous nous intéresserons au rôle joué par l'infrastructure sur le conducteur circulant sur les routes départementales, routes les plus fortement touchées par un nombre élevé d'accidents. Il convient d'abord de comprendre **le comportement du conducteur**. Cependant, pour réaliser une étude viable, le panel de conducteurs étudiés doit être à la fois varié et significatif. Cela passe par l'étude des véhicules lambda qui ne sont donc ni des véhicules banalisés ni des véhicules instrumentés. Le conducteur impose au véhicule un trajet sur la route en fonction de ce qu'il perçoit. L'acquisition de données passe par un système de capteurs qui transcrivent ces différentes actions et interactions.

La trajectoire de l'automobile est définie mathématiquement dans le domaine du trafic routier comme « une fonction continue de \mathbb{R}^+ dans \mathbb{R}^3 qui à tout instant t associe la position dans l'espace du centre de gravité du véhicule représenté par un point » [Daucher et Jacob, 2008]. **L'étude des trajectoires des véhicules** représente le seul moyen valable pour connaître le comportement des conducteurs. Une mesure en continue de la trajectoire s'impose. Cela comprend

sa géométrie (position), cinématique (vitesse, accélération, jerk¹) et dynamique (forces). Cet outil doit être le moins perceptible possible pour garder le comportement authentique de chaque conducteur.

Le comportement d'un conducteur et sa manière de conduire ne sont pas quantifiables par un ou plusieurs capteurs. Ceux-ci doivent assurer la non-perturbation du chauffeur afin de l'étudier dans son environnement et dans sa manière de conduire habituels. La mesure physique des trajectoires est un moyen d'appréhender ce comportement à condition d'effectuer cette mesure de manière non intrusive. La trajectoire identifie les conséquences des actions du conducteur. Une trajectoire est une ligne continue dans l'espace 3D qui associe une position pour tout instant t , rapportée à une référence. Une trajectoire est mesurable et quantifiable, ce qui est un grand avantage.

3.2 Méthode

Dans notre cas, nous nous limiterons à une trajectoire obtenue en évaluant les positions latérales et longitudinales ainsi que les vitesses. Ces trois paramètres sont définis en fonction d'un quatrième : le temps. Pour une première évaluation de ces trajectoires, ces quatre paramètres sont suffisants. L'erreur de la mesure sur ces variables influe sur la bonne connaissance des actions du conducteur sur le véhicule. La nécessité de capteurs pour acquérir l'information engendre la transformation d'une ligne continue en une ligne échantillonnée. En effet, l'acquisition de mesures s'obtient par échantillonnage. Le bon réglage de la fréquence d'échantillonnage donne, par interpolation, le caractère continu de la mesure. Les traces² effectives des véhicules, c'est-à-dire les trajectoires atemporelles des véhicules par rapport aux autres, se reconstruisent par interpolation des différentes mesures. La comparaison entre les traces des usagers face à différentes situations de conduite (variations des conditions météorologiques, changement des signalisations horizontales ou verticales...) donne des indications sur la dangerosité de la route et sur l'efficacité des actions menées pour la réduire.

3.3 Critères et contraintes

L'acquisition des mesures s'effectue grâce à des capteurs. La détermination du capteur adéquat s'opère suivant différents critères tels que ses conditions d'utilisation, la manière dont les mesures sont effectuées, la fréquence d'acquisition, sa précision, etc. Les laboratoires et gestionnaires travaillant dans ce domaine recherchent des systèmes analysant la trace avec une

1. La notion de jerk (ou secousse) a été introduite afin de quantifier les variations de l'accélération par rapport au temps. Il n'existe pas à l'heure actuelle de moyens directs de mesure externe de ce paramètre. Sa connaissance permet de mieux maîtriser la dynamique vibratoire d'un véhicule.

2. D'après le glossaire de la Métrologie des Trajectoires et du Trafic, la trace est : « la projection sur l'espace roulant du chemin parcouru par le centre de gravité d'un véhicule » [Olivero *et al.*, 2008].

précision de 1 cm pour la mesure de la position longitudinale³ et latérale, ainsi qu'une précision de 5 km/h pour la mesure de vitesse. Ces acquisitions se concrétisent sur des configurations de route à géométries variables (taille, relief, altitude, cadre...) et de manière indépendante des conditions météorologiques. Des capteurs discrets assurent la non-perturbation des habitudes de conduite des conducteurs.

Les véhicules circulent sur des routes régies par la réglementation française ce qui impliquent un certain nombre de réglementations pour les usagers de la route, notamment en terme de limitation de vitesse et de gabarit de véhicules. Le dispositif doit fonctionner sans interruption. Un système à faible coût et facile à mettre en oeuvre présente de réels avantages.

3. Une position longitudinale mesurée à 1 cm signifie que la position latérale du véhicule doit s'écarter au plus de 1 cm entre deux acquisitions successives de sa trace [[Plainchault, 2005](#)].

4.

Les technologies pour le suivi de trajectoire

4.1 Vocabulaire associé aux capteurs

Les capteurs permettent de transformer une grandeur physique, appelée mesurande ou excitation, en une grandeur électrique, reflet de son entrée et de ses variations. Deux catégories de capteurs existent : les capteurs passifs et ceux dits actifs. Les capteurs passifs sont sensibles au mesurande par l'intermédiaire de leurs propriétés électriques et/ou de leurs caractéristiques géométriques ou dimensionnelles. Citons par exemple, la résistivité des matériaux pour obtenir une information de température ou de déformation, les dispositifs de type condensateur (mouvement d'armatures dans un diélectrique). Les capteurs actifs convertissent l'énergie du mesurande en énergie électrique. Ils utilisent différents effets comme l'effet thermo-électrique, pyro-électrique, piezo-électrique, d'induction électromagnétique, photo-électrique, photo-émissif, photovoltaïque, photo-électromagnétique et Hall [Asch *et al.*, 1998], [Noury, 2002].

Les capteurs représentent l'élément principal d'un système métrologique. Pour le caractériser correctement, un vocabulaire spécifique s'est construit autour des capteurs et des caractéristiques métrologiques [Plainchault, 2006], [Sensors, 2006] :

- le mesurande : grandeur physique de la mesure ;
- le corps d'épreuve : élément mécanique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer ;
- l'étendue de mesure : domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. Les valeurs limites du domaine sont définies par les termes, « portée minimale » et « portée maximale » ;
- la sensibilité : c'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer. La sensibilité en régime dynamique exprime la variation de la sensibilité en fonction de la fréquence qui provient généralement de l'inertie mécanique, thermique ou électrique de la tête de mesure du capteur et du dispositif directement

- associé. Cette variation empêche le capteur de délivrer un signal qui suive instantanément les variations du mesurande, et ceci d'autant plus que la fréquence est plus élevée. Cette inertie peut être inhérente au principe physique de base du capteur mais elle est aussi très souvent due à la présence de composants électriques : résistances, inductances, capacités, qui introduisent dans la réponse des constantes de temps de la forme RC ou L/R ;
- la linéarité : un capteur est dit linéaire dans une plage déterminée du mesurande, si sa sensibilité est indépendante de la valeur du mesurande ;
 - la fréquence propre et la fréquence de résonance : la fréquence propre (ou fréquence naturelle non amortie) est la caractéristique principale du fonctionnement dynamique des capteurs. Elle est définie par le passage de la réponse en phase à la quadrature, ($\varphi = -\pi/2$). La fréquence de résonance (ou fréquence naturelle amortie) est la fréquence pour laquelle l'amplitude de la réponse est maximale ;
 - la bande passante : la bande passante d'un capteur est caractérisée par la linéarité de sa réponse en fréquence. Pour une plage de fréquence définie, elle est donnée, métrologiquement, en général à $\pm 5 \%$ ou à $\pm 0,5$ dB ;
 - l'étalonnage : ensemble des opérations qui permettent d'explicitier, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre les valeurs du mesurande et les valeurs de la grandeur électrique de sortie et ceci, compte tenu de tous paramètres additionnels susceptibles de modifier la réponse du capteur. L'usage d'un étalon est bien souvent nécessaire ;
 - la répétabilité ou fidélité : c'est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successives d'une même grandeur, effectuées avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts. C'est une valeur statique qui quantifie la dispersion des mesures ;
 - la justesse : c'est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises ;
 - la précision : elle quantifie l'erreur maximale de mesure, à savoir la différence maximale entre ce qu'indique l'affichage et la valeur vraie du paramètre mesuré, c'est-à-dire l'aptitude du capteur à donner la vraie valeur ;
 - la résolution ou mobilité : qualité qui caractérise l'aptitude d'un capteur à réagir et à donner le plus petit écart entre deux valeurs du mesurande ;
 - la reproductibilité : étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas où celles-ci sont effectuées dans des conditions différentes par rapport aux conditions dans le cadre de la répétabilité ;
 - la stabilité : qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple) ;
 - la rapidité : capacité du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer ;
 - le temps de réponse : grandeur qui caractérise la rapidité. Temps nécessaire au capteur pour réagir à une variation brusque du mesurande ;
 - les erreurs de mesure : elles peuvent être de différents types, c'est-à-dire systématique (constante ou à variation lente), aléatoire et accidentelle (température...).

4.2 La mesure de la trace

4.2.1 La vidéo

La vidéo a été développée initialement dans les systèmes de trafic pour permettre à un opérateur humain de contrôler et surveiller la circulation [Cohen, 2005]. Maintenant des recherches s'effectuent pour automatiser les systèmes de surveillance. La vidéo est fondée sur l'utilisation d'une ou plusieurs caméras qui filment une scène. Des traitements spécifiques - algorithmes de traitement du signal, de statistique ou de géométrie - traitent la succession d'images. L'analyse porte sur les changements de pixels d'une séquence d'images éventuellement pré-traitées selon les besoins de l'algorithme (mécanisme de seuillage, de segmentation...). Le positionnement de la caméra et les conditions météorologiques influent sur son champ de vision. Le positionnement de la caméra et l'angle d'observation de la zone constituent un point sensible car ils jouent sur la précision des mesures. Un compromis est à faire entre la précision des valeurs récoltées, la taille de la zone à étudier et le type d'informations obtenues (inter-distance, vitesse...). Il est possible d'effectuer de la classification¹, de la mesure de vitesse et de position, de la détection d'accident et du suivi de trajectoire. La vitesse est mesurée avec une précision comprise entre 5 et 10 km/h. Elle devrait s'améliorer dans les années à venir avec l'amélioration des algorithmes de traitement et la croissance des résolutions des caméras [Klein, 2001].

La vidéo s'embarque même sur les véhicules. Elle permet de localiser la voiture par rapport à son environnement. Dans le cadre d'un système d'assistance à la conduite, les marquages au sol présentent un bon moyen de repérage. L'utilisation de cette technique permet une étude de la position du véhicule sur la chaussée et donc de sa trajectoire. Les principaux algorithmes employés sont la segmentation et la détection de contours [Simond, 2005]. Une caméra installée verticalement sur un véhicule et regardant le sol donne une position latérale de l'ordre de 2 cm. Dans le cas contraire, la détection devient plus délicate [Ieng *et al.*, 2004].



FIGURE 4.1 – Une disposition possible d'un système vidéo, ici à l'avant du véhicule.

1. La classification permet de différencier les véhicules routiers suivant leur catégorie. Par exemple, la classification permet au moins de distinguer un poids lourds d'un véhicule léger.

De plus en plus, la recherche se focalise sur la vision stéréoscopique à bord des véhicules. Deux grandes méthodes sont employées [Lemondé et Devy, 2005], [Simond, 2005] : la correspondance entre plusieurs pixels et la rectification homographique². Pour cela, le plan de route doit être identique sur les deux images. Cependant la deuxième technique s'applique uniquement si la route est plane. Pour beaucoup d'autres méthodes cette condition est nécessaire.

De plus, dans un système retransmettant la (ou les) vidéo(s) vers un ordinateur central, la transmission des données nécessite un média très haut débit.

4.2.2 Les technologies hybrides : la fusion de données

La technologie hybride désigne ici la réunion de différents capteurs, dans le but d'obtenir des résultats plus fiables. Bien évidemment l'ajout de plusieurs technologies dans un même système n'est pas anodin. Le coût du système et la complexité du traitement des données sont des paramètres non négligeables dans l'acquisition du dispositif.

En France, le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) de l'Est a mis au point un dispositif installé en bord de chaussée et basé sur des cellules infrarouges et un télémètre à ultrasons. Baptisé FRAO, il récolte des données diverses comme l'heure de passage du véhicule, le temps entre les véhicules, la vitesse, la longueur et la position ou hauteur du véhicule. Ce système mesure la position latérale des véhicules à ± 20 cm. [Stanczyk et Millot, 2005].

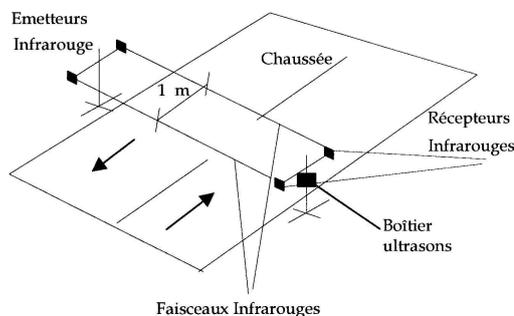


FIGURE 4.2 – Le système FRAO.

En Suisse, la société ASIM a développé des détecteurs incluant des infrarouges passifs, des ultrasons et un radar Doppler. La série des TT 290 combine au sein d'un même boîtier ces trois technologies. Dans ce cas, les infrarouges détectent la présence du véhicule et effectuent une opération de comptage, les ultrasons mesurent la hauteur et le radar mesure la vitesse.

Dans le cadre du thème Recherche des Attributs pour le Diagnostic Avancé des Ruptures de la Route (RADARR) du projet Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires (SARI), le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a développé un outil de suivi des véhicules depuis le bord de voie. Cet outil intègre deux caméras vidéo et un télémètre [Goyat *et al.*, 2006]. Un post-traitement fournit la trace du véhicule.

2. La rectification homographique rectifie l'image pour que son plan soit parallèle au le plan de projection.

Pour améliorer l'efficacité des radars actuels (paragraphe 4.3.2.5 page 32), l'Europe a mis en place le projet CARSENSE, projet financé par la commission européenne. Son but est de fusionner des données provenant de deux radars (un de courte portée et un autre de longue portée), de deux caméras (stéréovision) et d'un télémètre laser [CARSENSE, 2003]. Ce projet n'est pas complètement terminé, néanmoins, il a ouvert la voie vers de nouveaux domaines de recherche comme la fusion de données [LIVIC, 2006].

Le projet Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée (LAVIA) propose un système au sein du véhicule qui intègre la combinaison d'un GPS, d'un odomètre et d'un gyromètre et d'une carte digitalisée de la région où il circule. A partir de ces informations, l'ordinateur de bord identifie la position, la vitesse limite autorisée sur la route et régule automatiquement la vitesse du véhicule [projet LAVIA, 2006].

4.2.3 Bilan de la mesure de la trace

La majeure partie des solutions développées déploie un système à base de caméras. Certains projets expérimentent la mesure de la trace avec, souvent, le besoin d'utiliser plusieurs capteurs de technologies différentes. La fusion de données agrège les données provenant des différentes sources. Néanmoins, cette technique est gourmande en calcul. Excluant l'utilisation de la caméra en raison de son caractère intrusif pour le conducteur, seuls des systèmes expérimentaux combinant différents capteurs sont disponibles. Pour répondre à nos besoins, étudions les capteurs existants ayant la capacité de mesurer une position et/ou une vitesse. Historiquement, la position de la voiture fut la première mesure à être acquise. Elle peut être complétée par d'autres comme la vitesse, l'accélération ou le jerk.

L'accélération exprime la variation de vitesse d'un système. Elle est donnée par des accéléromètres. Beaucoup de ces capteurs sont réalisés à partir de la technologie MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems), c'est-à-dire qu'ils emploient l'énergie électrique pour alimenter leur microsystème mécanique. Il y a principalement quatre technologies d'accéléromètre : piézo-électrique, piézo-résistif, capacitif ou asservi. Mais des systèmes à fibre optique voient le jour. Leur principe est fondé sur la mesure de la force à laquelle est soumise une masse, pour en déduire son accélération. Ce capteur est très couramment employé dans les véhicules pour établir son comportement dynamique. L'avantage d'un accéléromètre est sa grande facilité à révéler une multitude de données (accélération, vitesse, déplacement, force...). Il possède une dynamique de mesure très étendue et l'influence des éléments extérieurs, telle que la température, est négligeable sur sa mesure [Duhamel *et al.*, 2002]. Néanmoins l'obtention du déplacement nécessite une double intégration entraînant des problèmes d'échantillonnage et de précision.

La classification des systèmes de capteurs proposée par la suite identifie la manière d'utiliser et d'installer ces capteurs. Dans un premier temps, les systèmes d'acquisition non embarqués sur le véhicule sont triés suivant leur rayon d'action ; Par exemple si un contact apparent est nécessaire entre le véhicule et le capteur. Dans un deuxième temps, il a été décidé de classer les différents capteurs suivant leur mode d'utilisation, c'est-à-dire si une partie, voire l'ensemble,

du système d'acquisition est positionnée sur le véhicule. Un catalogue est réalisé différenciant la méthode de localisation du système. Une localisation dite relative utilise un ou des capteurs proprioceptifs qui positionnent le véhicule par rapport à une référence initiale. Une localisation absolue emploie un ou des capteurs extéroceptifs. Ils positionnent le véhicule par rapport à des repères fixes de ou dans l'environnement. La vidéo, déjà identifiée au paragraphe 4.2.1, n'est pas répertoriée dans ce catalogue. Nous n'évoquerons pas également les techniques à base de l'accélération ou de jerk. Pour mesurer la position, ces techniques demandent au moins deux intégrations entraînant une dérive de la mesure.

4.3 Les systèmes de capteurs non embarqués

4.3.1 Les capteurs à contact

Les capteurs à contact sont déformés par les pneus des véhicules. Cette déformation engendre une variation de la mesurande. Le relevé de cette variation fournit des informations exploitables comme la localisation, la vitesse du véhicule et le comptage des véhicules.

4.3.1.1 Le capteur pneumatique

Il est parmi les premiers à avoir été développé dans le but de faire de la métrologie à savoir du comptage et de la mesure de vitesse. Depuis les années 1920, date de son invention, ce système a eu le temps de mûrir, pour aboutir à un système sûr, maîtrisé, simple et peu onéreux. Le dispositif se compose d'un tube en caoutchouc. Lors du passage d'un véhicule sur le câble, la variation de pression de l'air dans le tube se propage jusqu'à un détecteur situé à l'une des extrémités. Cette modification de pression actionne un contact électrique [Martin *et al.*, 2003].

Le système se pose sur la chaussée perpendiculairement à l'axe de la route. Il est fixé sur les bords et éventuellement au milieu de la chaussée avec des brides clouées ou vissées au sol. Le tuyau dans lequel l'air circule est généralement en caoutchouc. Ce matériau autorise un allongement du tuyau afin d'éviter sa rupture et lui confère une résistance à la température [SETRA/CSTR, 1995].



FIGURE 4.3 – Représentation de configurations possibles pour l’installation des tubes pneumatiques, source [Klein et Kelley, 1996].

Ce dispositif permet de localiser un véhicule sur la chaussée à un endroit précis où le caoutchouc est positionné. Ce système est fiable, robuste et faiblement soumis à des perturbations. Son temps de réaction est de l’ordre de 20 ms. Néanmoins, un passage trop répété de camions et de bus détériore le système. Le capteur pneumatique ne permet pas de mesurer directement une position latérale.

L’utilisation de deux tubes dont l’interdistance est connue et maîtrisée autorise une mesure de vitesse dont la précision ne descend pas sous la barre des 10 % [Klein et Kelley, 1996]. Cette distance est souvent au moins égale à 30 cm.

4.3.1.2 Les capteurs de pesée, WIM

Les capteurs piézo-électriques, extensométriques, de force et optiques sont des capteurs de pesée de véhicule en mouvement (*Weigh In Motion (WIM)*). L’erreur de mesure du poids d’un camion est obtenue à 15 % environ. Elle est parfois meilleure notamment pour les capteurs extensométriques [Hallenbeck et Weinblatt, 2004]. L’état de la route joue un rôle primordial pour obtenir une qualité de mesure : la route doit présenter peu d’orniérages. Dans ces conditions, l’erreur de mesure du poids d’un poids lourd, roulant à une vitesse inférieure à 5 km/h, est de 2 %. Si ces conditions changent, cette erreur peut s’élever au-delà des 40 %.

Ces capteurs peuvent également servir à dénombrer les véhicules, voire à mesurer leur vitesse, à condition d'installer deux dispositifs sur la route. Toutefois, ces derniers n'ont pas été conçus pour ce type de mesure. Un nouveau capteur d'effort pneumatique/chaussée a vu le jour dans le cadre du thème RADARR du projet SARI. Ce capteur, dénommé système MEVI, mesure les efforts suivant les trois axes du repère cartésien [Coiret et Lechner, 2006].

Le capteur piézo-électrique

L'effet piézo-électrique, qui est le principe de base de ce capteur, se manifeste par une polarisation électrique de certains cristaux lorsqu'ils sont soumis à des déformations mécaniques. Réciproquement, un changement de leur polarisation a lieu sous l'action de certaines déformations mécaniques. La constante diélectrique des matériaux piézoélectriques varie en fonction de la charge qui est appliquée sur le matériau [Iaquinta *et al.*, 2004]. La bande passante des capteurs piézo-électriques est très importante (jusqu'à 30 kHz). Ils ont une très bonne sensibilité de mesure. Ceci en fait un capteur idéal pour la détection de phénomènes dynamiques. Pour créer un capteur piézo-électrique, il est courant d'utiliser de la céramique piézo-électrique - qui est un matériau ferro-électrique rendu piézo-électrique suivant une direction de polarisation donnée - ou encore plus récemment du quartz [Kowlessur, 2001]. Ces câbles piézo-électriques sont ensuite encastrés dans une résine puis insérés dans la chaussée.

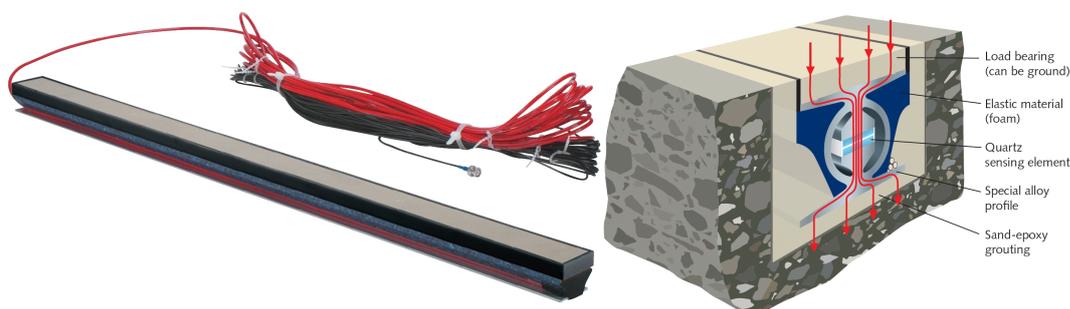


FIGURE 4.4 – Capteur de trafic piézo-électrique à quartz (capteur Lineas de chez Kistler).

Les capteurs piézo-électriques sont sensibles à la température et ne sont pas adaptés pour recueillir des mesures dans un trafic qui roule au pas (facteur dynamique qui n'est pas suffisamment important).

Le capteur extensométrique

Ces systèmes peuvent se poser directement sur la chaussée. Ils trouvent ainsi leur utilité dans les phases de pré-études afin de positionner au mieux dans la chaussée de la route le futur capteur de pesée [Yannis et Antoniou, 2005]. Comme le capteur de force, leur installation requiert deux capteurs disposés sur une demi-voie de circulation. Le poids est mesuré à l'aide de deux mesures obtenues à chaque extrémité de l'essieu. Le système est complété par des boucles électromagnétiques pour accroître la précision de la mesure en indiquant le type de véhicule qui arrive sur le capteur extensométrique comme le montre la figure 4.5.

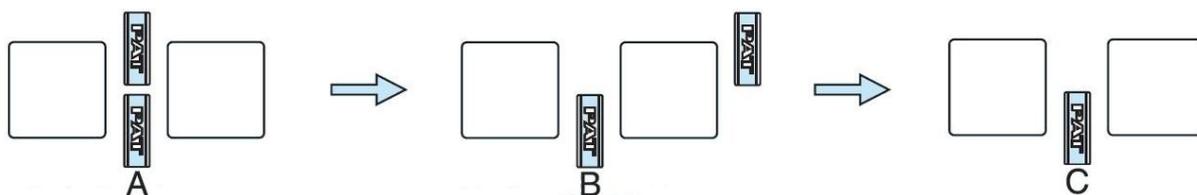


FIGURE 4.5 – Exemple d’installation de deux capteurs extensométriques avec en amont et en aval deux boucles électromagnétiques (A : alignés entre les boucles, B : en quinconce, C : tout seul), source International Road Dynamics (IRD) Inc.

Ce capteur utilise le principe de mesure des jauges de déformation : la résistance électrique varie lorsque le matériau est soumis à une déformation (étirement ou raccourcissement). Le terme anglais les désigne par *strain gauge*, voire *extensometric sensor*. Dans cette catégorie, le capteur extensométrique le plus connu porte le nom anglais de *bending plate*. C’est une plaque d’acier sur laquelle sont collées plusieurs jauges de déformation.



FIGURE 4.6 – Présentation d’un capteur « bending plate », source ORNL.

Un nouveau capteur extensométrique a été conçu [Barsanescu *et al.*, 2007]. Encore à l’état de prototype, il permet de connaître la position des roues. Il est constitué de nombreuses jauges de déformation afin d’obtenir plusieurs capteurs de pesée mis côte à côte dans l’axe de déplacement du véhicule. Un autre système original recueille la position latérale d’un véhicule en utilisant un tube sur les extrémités duquel sont montés deux capteurs piezo-électriques. La zone de déformation est récupérée par l’analyse temporelle des signaux reçus [Sekula *et al.*, 2004]. En 2004, il était testé en simulation.

Le capteur de force

Le terme « capteur de force » est une pâle traduction du terme anglais *load cell*. Un de ses synonymes est « capteur de charge ». Ce système est principalement utilisé pour effectuer des opérations de pesage dynamique. Cette méthode utilise un capteur de force inséré dans une caisse métallique. La plaque supérieure est amovible. Installé dans la chaussée, il devient très coûteux. Cependant il est souvent considéré comme le capteur le plus précis des capteurs de pesée [Hallenbeck et Weinblatt, 2004], [Yannis et Antoniou, 2005]. Certains systèmes à capteurs

de force utilisent un transducteur constitué d'une jauge de déformation. Ils sont néanmoins séparés des capteurs extensométriques dans la mesure où ils peuvent être élaborés suivant d'autres technologies, hydraulique par exemple.

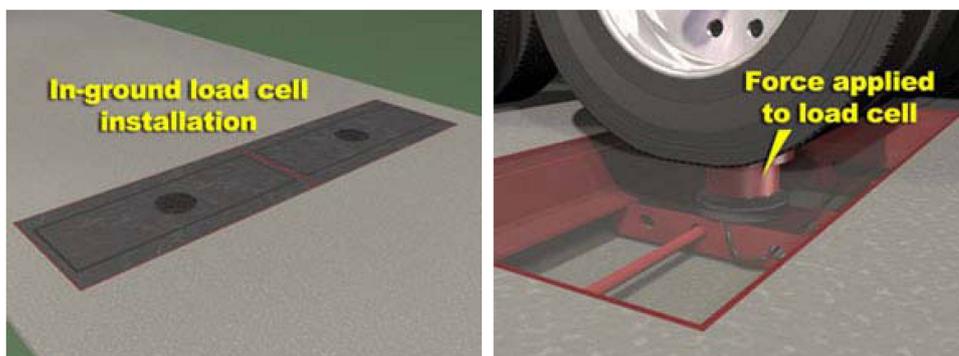


FIGURE 4.7 – Présentation du capteur de force, source Oak Ridge National Laboratory (ORNL).

Le capteur à fibre optique

Dans le cas d'un système de pesée par fibre optique, le principe repose sur la modification du faisceau lumineux qui se propage dans la fibre monomode et biréfringente. Initialement, l'onde émise est séparée en deux composantes de polarisation orthogonales. A son bout est disposé un miroir permettant une réflexion du signal ou un récepteur optique. L'onde lumineuse se propage dans la fibre. Seule une des composantes est perturbée sous l'effet d'une pression. L'analyse du déphasage entre ces deux composantes permet d'obtenir un grand nombre de données [Safaai-Jazi *et al.*, 1990]. Néanmoins cette technique n'est pas encore très usitée car ce type de capteur n'est pas encore industrialisé.

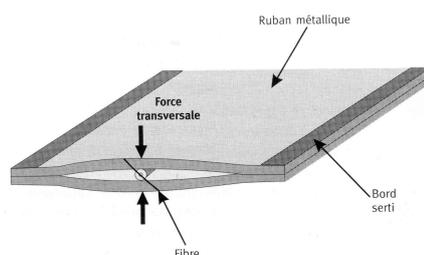


FIGURE 4.8 – Système à fibre optique, source [SETRA/CSTR, 1995].

La fibre est placée entre deux rubans métalliques, le tout collé sur la chaussée. A l'inverse des autres capteurs WIM, il est très polyvalent : classification de véhicule, pesage dynamique, détection d'anomalies de suspensions et de gonflage de pneus, mesure de fluctuations de la température de la chaussée et de la vitesse. Outre sa large diversité de mesures, son temps de réponse est extrêmement rapide et elle est insensible aux ondes électromagnétiques.

D'autres installations la positionne dans l'enrobé de la route et la protège par de la résine. Cette configuration permet de compter les véhicules et d'effectuer de la classification [Line, 2009]. La mesure n'est plus suffisamment fiable pour estimer correctement le poids des véhicules.

4.3.1.3 Le capteur résistif

Sous l'effet d'une pression, deux surfaces conductrices initialement séparées par des éléments élastiques entrent en contact. En détectant les essieux, ce capteur donne l'information de présence. Par contre, ce dispositif a une courte durée de vie. Néanmoins, il trouve son utilité comme détecteur de piéton. Il se présente sous la forme d'un tapis en caoutchouc dans lequel des éléments actifs sont intégrés et dont l'impédance varie en fonction de la pression appliquée sur le tapis [SETRA/CSTR, 1995], [David *et al.*, 1999]. Pour des applications routières, ce capteur est encore à l'état de prototype.

4.3.2 Les capteurs actifs sans contact

4.3.2.1 Présentation

Ils sont constitués d'un émetteur et d'un récepteur. L'émetteur envoie une onde reçue ensuite par le récepteur. L'onde est de nature différente : elle est soit électro-magnétique soit acoustique. Dans le cas des capteurs infrarouges ou du radar, elle est électro-magnétique. Seule une longueur d'onde différente les distingue. Pour les capteurs à ultrasons, l'onde est acoustique.

La mesure de distance est obtenue à partir du temps de vol de l'onde, c'est-à-dire du temps mis par l'onde depuis son émission jusqu'à son retour au récepteur après réflexion sur la cible. Ces ondes sont envoyées sous forme de trains d'ondes. Le récepteur convertit l'énergie des ondes réfléchies en un signal électrique. La mesure du temps séparant l'émission et la réception du signal permet d'en déduire la distance de l'objet.

Ces capteurs effectuent également du comptage, de la détection de présence et de la mesure du trafic. La vitesse se mesure souvent en utilisant l'effet Doppler ou la variation du temps de vol. L'effet Doppler décrit l'impact d'une onde réfléchi par un objet en mouvement.

4.3.2.2 La disposition des capteurs

Ils s'installent de plusieurs façons selon l'application souhaitée [SETRA/CSTR, 1995].

Le mode barrage

L'émetteur et le récepteur sont séparés (figure 4.9). Ainsi en présence d'un obstacle bloquant l'onde entre ces deux éléments, le récepteur ne reçoit pas de signal de l'émetteur.

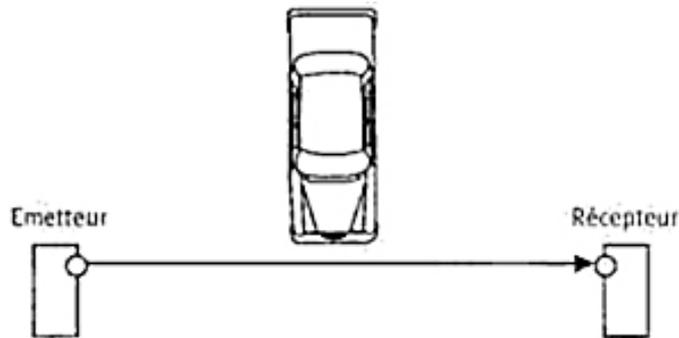


FIGURE 4.9 – Configuration des capteurs suivant le mode barrage.

Le mode reflex

L'émetteur et le récepteur sont placés côte à côte. Une plaque réfléchissante est placée plus loin pour limiter la zone de détection. Le signal est donc réfléchi sur cette surface et revient vers le récepteur près de l'émetteur. Dans le cas du passage d'un obstacle, le signal est coupé. Le capteur ne reçoit aucune information.

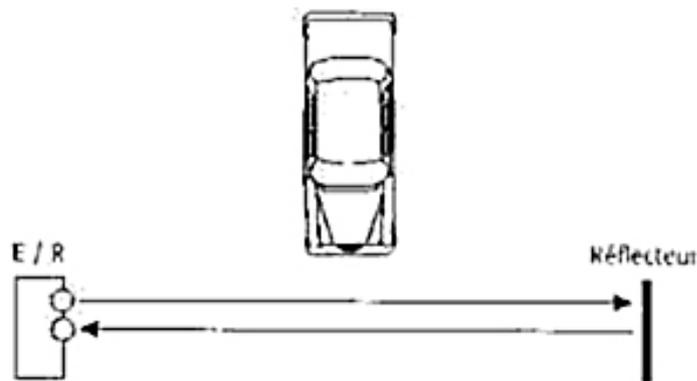


FIGURE 4.10 – Configuration des capteurs suivant le mode reflex.

Mode de proximité

Il s'agit d'un mode qui ressemble au mode reflex. Il se distingue par l'absence du réflecteur (figure 4.11). Sa portée est plus limitée car c'est l'obstacle qui joue le rôle de réflecteur. L'absorption du signal lumineux est donc plus significative.

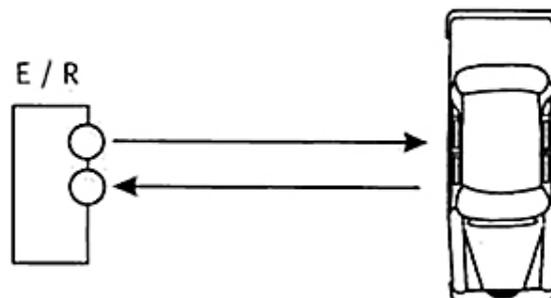


FIGURE 4.11 – Configuration des capteurs suivant le mode de proximité.

Ce système s'accroche en hauteur à un mât de fixation ou une glissière de sécurité. En position de visée verticale (figure 4.12), il sert plus particulièrement à réaliser une différence entre les voitures et les poids lourds. En visée verticale, le problème se pose lorsqu'un véhicule léger transporte des objets sur son toit (vélo, meubles, bagages...).

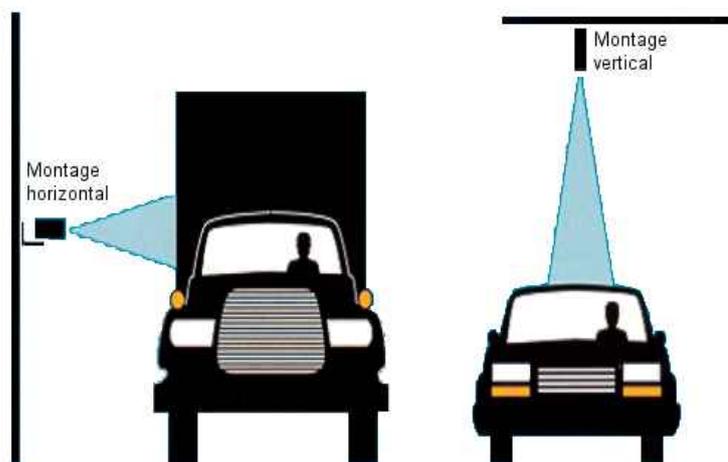


FIGURE 4.12 – Positionnement d'un capteur en mode de proximité (ici ce capteur utilise une technologie fondée sur les ultrasons, cf. paragraphe 4.3.2.4 page 31).

4.3.2.3 Le capteur à infrarouge

L'émetteur envoie une onde infrarouge dont la largeur de bande est fine (led ou laser). Dans le cas du mode barrage, la portée s'étend jusqu'à 200 m. Leur temps de réponse est très rapide (10 ms).

En utilisant deux capteurs infrarouges actifs, la vitesse est obtenue avec une précision de 5% [Klein, 2001].

En cas d'utilisation prolongée du système de mesure à infrarouge, il est nécessaire de nettoyer le système. Des saletés peuvent limiter leur passage. De plus, le mauvais temps limite les capacités de détection des infrarouges. De même, un soleil trop intense peut entraîner de fausses détections en raison de la réflexion des rayons lumineux ou de leur arrivée directe sur le capteur.

4.3.2.4 Le capteur à ultrasons

Une antenne directive émet des ondes sonores à une fréquence comprise entre 25 et 100 kHz, fréquence inaudible pour l'oreille humaine d'un adulte. Les longueurs d'onde correspondantes varient entre 3,4 mm et 17 mm. Du fait de leurs faibles valeurs, les ultrasons se propagent essentiellement en ligne droite [Mauris, 1992].

La vitesse est une grandeur plus délicate à obtenir avec ce capteur. La technique du radar à impulsions est utilisée. L'envoi de plusieurs impulsions consécutives affine la précision de ces mesures [Thourel, 1982].

Certains capteurs à ultrasons ont une précision de 0,2 mm sur la mesure de la distance et de 0,5 km/h pour l'évaluation de la vitesse [Hexamite, 2006]. Les capteurs destinés au grand public ont une précision de 10 % jusqu'à 120 km/h sur une distance de huit mètres. La majorité de ces systèmes ne sont pas toujours fiables car ils définissent une vitesse du son fixe. Or cette vitesse fluctue selon la température, la pression ou la pluviométrie.

4.3.2.5 Le radar : capteur à micro-ondes

Inventés peu avant la Deuxième Guerre mondiale, les radars ont été initialement développés pour détecter des objets. Ce mot provient de la combinaison de « Radio Detection And Ranging ». C'est un capteur à ondes électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes dont la fréquence varie entre 1 GHz et 300 GHz (c'est-à-dire une longueur d'onde comprise entre 1 cm et 30 cm). Néanmoins, les radars les plus performants utilisent des fréquences atteignant 77 GHz. La gestion du trafic fait appel à des radars dont la fréquence retenue est de 10,525 GHz dans la bande X (entre 8 GHz et 12 GHz). Les derniers modèles de radars fonctionnent à 76 GHz (contre 24 GHz actuellement). Les versions récentes des radars à micro-ondes de la gendarmerie ont une portée 350 m. Suivant la longueur d'onde utilisée, il peut détecter un objet jusqu'à 500 km (cas des radars pour les avions).

Le radar transmet son énergie par l'intermédiaire d'une antenne directive. Par cette même antenne, il reçoit une partie du signal réfléchi par la voiture. En fonction de la composition du signal émis, l'analyse de sa réverbération peut donner différentes informations comme la vitesse du véhicule. Divers radars sont référencés (à impulsions, à ondes continues, à poursuite automatique, à compression d'impulsions, Doppler à impulsions) [Thourel, 1982]. Néanmoins, seuls les radars à ondes continues sont utilisés pour les équipements routiers. Ce type de radars se décline en deux versions : le radar à ondes continues (appelé parfois radar Doppler) et le radar à ondes continues modulées en fréquence.

Dans le cas d'un système à ondes continues « simples », il est possible de vérifier la présence d'un véhicule en mouvement dans une zone visée ainsi que sa vitesse. Mais il est important de souligner que c'est un appareil qui donne directement la mesure de vitesse puis par intégration, la distance.

Ces dispositifs ont une résolution de 5 km/h, une précision de ± 1 km/h et une résolution en distance comprise entre 4 et 5 m pour une précision de ± 1 m [Alessandretti, 2003], avec un temps de réponse inférieur à 20 ms. La portée dépend de la longueur d'onde utilisée.

4.3.3 Les capteurs passifs sans contact

Ces capteurs se distinguent par le simple emploi d'un récepteur basé sur l'onde étudiée.

4.3.3.1 Les capteurs passifs à infrarouge

Ils détectent la chaleur émise par tous les corps. Ils sont déployés pour repérer les piétons ou bien la chaleur émise par un moteur en tenant compte de l'apport d'énergie provoqué par le véhicule en mouvement (figure 4.13). Ils sont disposés sur des mâts visant la zone de détection souhaitée [Violette, 2003]. Des précisions similaires aux systèmes utilisant la vidéo sont obtenues [Klein, 2001]. Ce type de capteur a un temps de réponse relativement long : un peu moins de 250 ms. Les capteurs à infrarouges passifs repèrent dans une zone donnée les véhicules. Certains systèmes intègrent plusieurs capteurs dans un même boîtier. Plusieurs zones sont ainsi surveillées en même temps. Il est alors possible de récupérer la vitesse du véhicule mais l'erreur de mesure dépasse les 10 %. Certains capteurs vidéos sont sensibles à l'infrarouge. Les techniques de traitement de l'image sont alors utilisées.

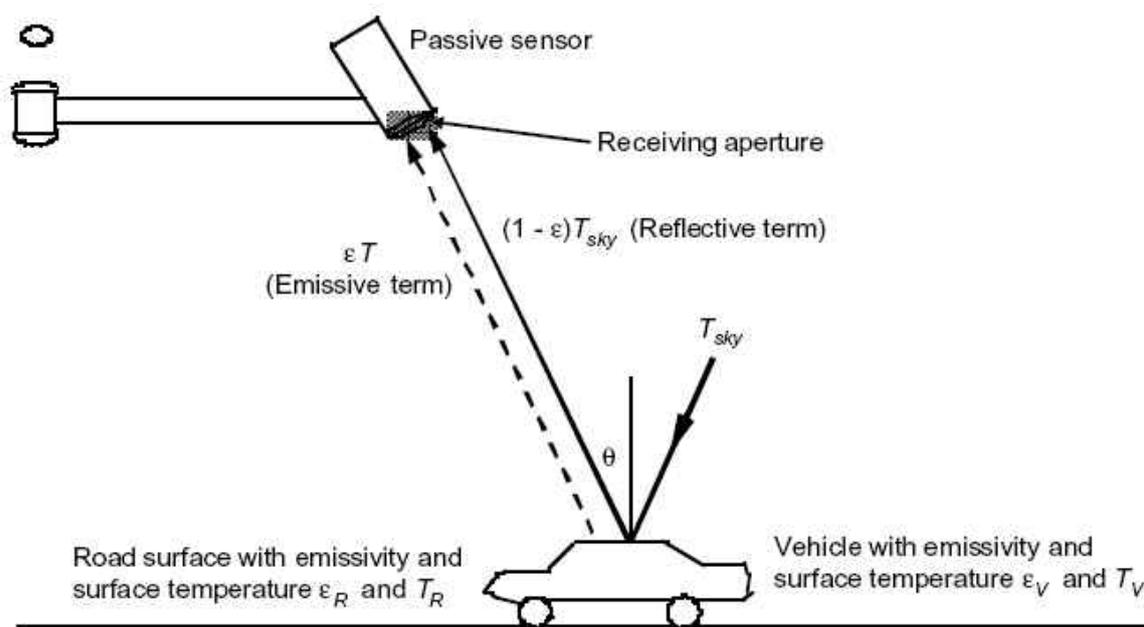


FIGURE 4.13 – Dispositif à base d'un capteur à infrarouge passif.

4.3.3.2 Les capteurs magnétiques

Le capteur magnétique est apparu au cours des années 1990. La terre est entourée d'un champ magnétique considéré comme constant à notre échelle. Le but de ce capteur est d'analyser les fluctuations de ce champ. En effet, quand une masse métallique, comme un véhicule, circule, elle modifie localement ce champ [Ding, 2003].

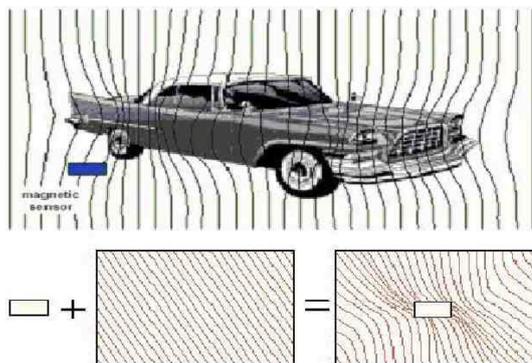


FIGURE 4.14 – Représentation de l’influence d’un véhicule sur les lignes de champ terrestre.

Ce capteur peut se placer soit au milieu, soit en bordure de la chaussée.

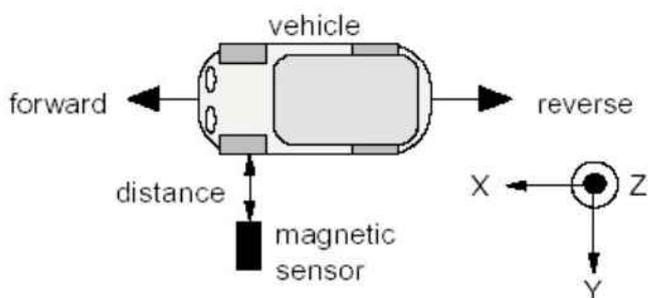


FIGURE 4.15 – Positionnement d’un capteur magnétique.

Il est possible de compter les véhicules et de mesurer leur longueur. En combinant deux capteurs, la mesure de la vitesse est réalisable avec une précision inférieure à 10 %. Néanmoins, aux Etats-Unis, des chercheurs arrivent à employer un seul capteur pour réaliser des mesures de vitesse moyenne. Les estimations ne sont pas encore aussi performantes que celles des boucles [Cheung *et al.*, 2004]. Cette technique ne permet que d’observer un véhicule dans une zone. Les positions longitudinale et latérale ne sont pas mesurables.

Certains systèmes sont composés d’un cylindre de 135 mm de hauteur à insérer dans la chaussée. D’autres se posent avec une simple saignée (comme pour les boucles magnétiques).

4.3.3.3 Les boucles électromagnétiques

Présentation

Elles sont développées depuis les années 60 comme de simples compteurs de véhicules. Leur utilisation actuelle s’étend très largement dans des systèmes de gestion avancée de la circulation. Dans les années 1980, cette méthode est devenue de plus en plus robuste, étendant sa simple action de compteur.

Son but est de mesurer une variation du champ magnétique générée par un fil, enfoui à quelques centimètres dans la chaussée.

Constitution

Le système est constitué de quelques spires (simple fil enroulé), d'une centrale pour l'électronique et d'un câble blindé et torsadé pour connecter les spires à l'électronique. La configuration des boucles est variable : triangle, rectangle, losange... Le fil isolé est enroulé de telle manière à former quelques spires (3 à 4). Il est parcouru par un courant sinusoïdal souvent choisi entre 10 kHz et 200 kHz. Initialement, le générateur est accordé sur la fréquence de résonance de la boucle. Ainsi, quand une masse métallique passe près de celle-ci, le circuit n'est plus accordé et l'inductance diminue [Gibson et Tweedy, 1998] (création de courant de Foucault dans la partie métallique du véhicule qui engendre à son tour un champ électromagnétique s'opposant au champ qui l'a créé (loi de Lenz)).

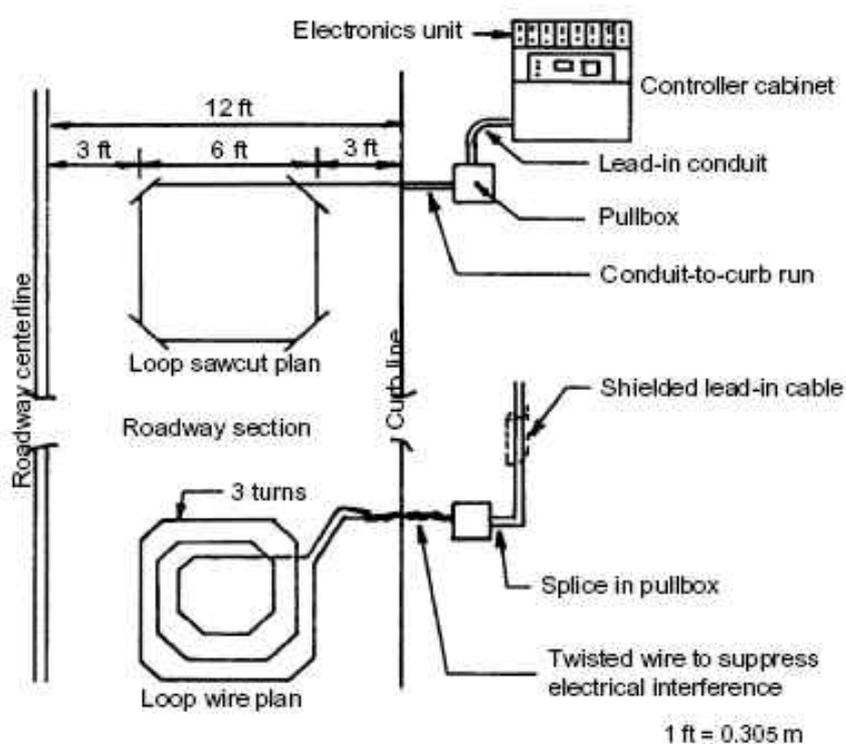


FIGURE 4.16 – Composition d'un système à boucle magnétique.

Les boucles sont enfouies dans la chaussée. Une saignée d'une profondeur maximale de 100 mm et d'une largeur inférieure à 20 mm est creusée. Après nettoyage, du sable est disposé au fond de la saignée sur lequel la boucle est posée. Les boucles sont prévues pour effectuer des mesures dans une seule voie de circulation.

Utilisation

Ce capteur s'emploie principalement dans la gestion des carrefours. Pour réaliser des mesures de vitesse et de la position latérale du véhicule, deux boucles décalées latéralement sont nécessaires. La comparaison des signatures sert à retrouver la position latérale. Pour obtenir

une classification des véhicules inférieure à 3 %, il est nécessaire d'employer les hautes fréquences (à partir de 100 kHz). En effet, les petits objets métalliques sont mieux détectés à ces fréquences. Outre le fait qu'il soit faiblement visible, il est insensible aux différentes conditions météorologiques.

Des possibilités d'avenir

Des équipes de chercheurs travaillent actuellement sur la détection de la catégorie d'une voiture suivant la perturbation laissée par celui-ci lors de son passage, c'est-à-dire sur sa signature [Bertrand et Dicko, 2000]. Certains traitements de données permettent d'établir une différenciation entre chaque type de véhicules car chacun possède sa propre signature. L'emploi des probabilités (approche bayésienne ou de la logique floue) est un des outils possibles pour l'identification des véhicules [Coue, 2003] [Ieng *et al.*, 2005].

Des recherches récentes permettent d'évaluer la vitesse moyenne du trafic [Oh *et al.*, 2002], [Wang et Nihan, 2000] ou d'estimer la vitesse de chaque véhicule [Sun et Ritchie, 1999] avec une seule boucle. La précision est comprise entre 5 et 10 %.

4.3.3.4 Le capteur phonique

Ce capteur étudie les ondes sonores générées par la circulation. A l'aide de capteurs acoustiques passifs, il mesure le bruit environnant puis effectue par tranche de quelques minutes des enregistrements. En évaluant la dynamique du signal, l'état du trafic est estimé (fluide, saturé, bloqué). Il est également possible de connaître la vitesse moyenne des véhicules en considérant une longueur prédéfinie des véhicules [Klein, 2001]. La position sur la chaussée du véhicule n'est que très approximative.

Ce capteur est en réalité composé, selon les systèmes, d'un ou plusieurs microphones (figure 4.17) qui permettent de percevoir le bruit sonore et ultrasonore des véhicules. En métrologie, il est nécessaire de disposer de plusieurs microphones mis sous forme d'une grille, afin de quadriller une zone. Certains de ces capteurs peuvent être directionnels, facilitant la limitation de la zone étudiée [Ding, 2003]. Il faut compter un temps de réponse de 50 ms. Le capteur doit également être situé à une distance de moins de 11 m par rapport aux véhicules. Leur précision dépendra des microphones installés dans le dispositif.



FIGURE 4.17 – Capteur acoustique passif présentant des matrices de microphone.

Son état de développement est encore considéré comme un prototype, ce qui explique son unique utilisation lors de programmes de recherche.

4.4 Les systèmes de capteurs embarqués

4.4.1 Les capteurs proprioceptifs

Ces capteurs s’installent sur le véhicule et fournissent une information de position des éléments extérieurs par rapport à celui-ci.

4.4.1.1 Les capteurs actifs à ondes

Selon les explications données dans le paragraphe 4.3.2, ces mêmes capteurs (infrarouges, ultrasons, micro-ondes), placés sur un véhicule, sont utilisables pour se positionner dans un environnement. Néanmoins, le dispositif se fixe dans ce cas à l’extérieur de la voiture, orienté vers la zone à analyser. Parmi les capteurs infrarouges, le Lidar est un capteur prometteur.

Le Lidar (Light Detection and Ranging ; ou Laser Imaging Detection and Ranging) est un laser télémétrique. Il balaye un plan grâce à son laser et fournit ensuite un couple de valeurs comprenant l’angle et la distance (coordonnées polaires). Le rayon laser est ensuite dévié pour scanner une large zone.



FIGURE 4.18 – Champ de détection du Lidar installé sur le devant d’un véhicule.

La fréquence d’échantillonnage de ce capteur est plutôt bonne : moins de 0,1 s pour balayer un angle de 180° avec, à chaque incrément, d’angle une excellente précision : la mesure de l’objet s’effectue à 5 cm près, sachant que sa portée est de 200 m. Les objets doivent

réfléter correctement le faisceau laser. Dans le cas contraire, la portée est au moins divisée par deux. Cependant, il est très sensible aux conditions extérieures, contrairement aux radars [Trassoudaine, 2004]. De fausses détections d'obstacles peuvent également être repérées en cas de virages, crevasses... Il utilise le principe de « self-mixing », c'est-à-dire, des interférences entre deux ondes dans un milieu actif comme celui d'une diode laser [Suleiman *et al.*, 2008].

4.4.1.2 L'odomètre et le tachymètre

L'odométrie consiste à déterminer la position et le cap d'un véhicule circulant sur un sol plan. Ces mesures sont données par rapport à un repère de référence, repère pris dans la configuration initiale du véhicule [Aldon, 2001], [Borenstein *et al.*, 1996].

Le principe de l'odomètre est basé sur la mesure de la distance parcourue d'une roue entre deux instants. La position du véhicule se détermine par des intégrations successives des données sur les échantillons. Pour mesurer cette distance, des codeurs incrémentaux ou des roues codeuses sont placés sur les roues du véhicule ou directement sur sa propre roue afin de ne pas prendre en compte un déplacement lors d'un dérapage.

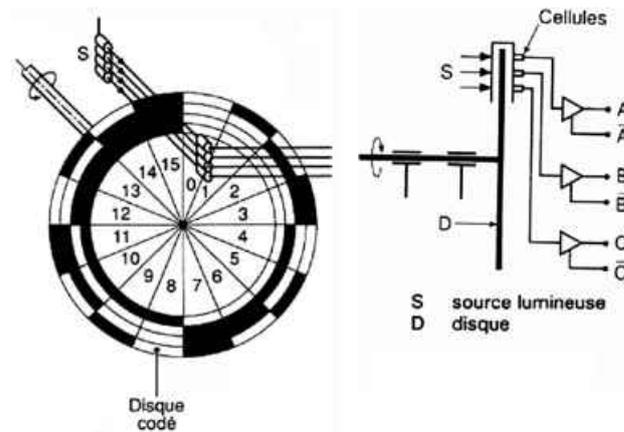


FIGURE 4.19 – Codeur absolu ou de position à 16 segments.

Le tachymètre mesure en permanence la vitesse angulaire de rotation d'une roue. Il peut être souvent considéré comme un capteur de proximité dans la mesure où le mouvement est périodique. Deux types de tachymètres existent : le tachymètre électromagnétique et le tachymètre à impulsions [Asch *et al.*, 1998]. Le premier utilise une mesure de flux dont l'amplitude est proportionnelle à la vitesse du déplacement (génératrice tachymétrique). Le deuxième présente une structure particulière du corps d'épreuve (souvent un disque circulaire solidaire de l'arbre dont la vitesse de rotation est à déterminer et qui est haché (dents, fentes, trous). Un système adapté vient ensuite, en regard du corps d'épreuve, repérer ses discontinuités. Un tel dispositif fonctionnant à partir d'un détecteur optique est présenté sur la figure suivante.

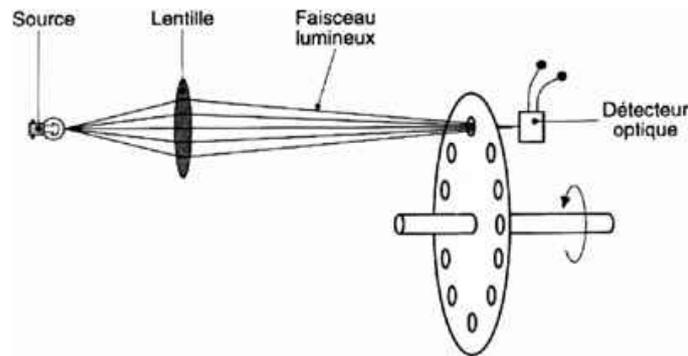


FIGURE 4.20 – Tachymètre optique.

4.4.1.3 Le gyromètre

Le gyromètre est un capteur de vitesse angulaire. Il est parfois constitué d'un gyroscope (capteur de position angulaire) à un axe, doté d'un rappel élastique (ressort ou moteur couple) et d'un amortissement visqueux autour de son axe de sortie. Il mesure le couple de rappel appliqué à l'équipage mobile, ce couple de rappel étant proportionnel à la vitesse de rotation du boîtier.

Il existe deux grandes catégories de gyroscope [Aldon, 2001] : le gyroscope à oscillateur piézo-électrique et à fibre optique. Il existe des gyromètres acoustiques moins courants.

Le premier utilise plusieurs éléments vibrants qui émettent des signaux sinusoïdaux identiques et d'amplitude constante lorsque le capteur est au repos. Lorsque celui-ci est soumis à un mouvement de rotation, les forces de Coriolis³ induisent une variation d'amplitude de ces signaux.

Le deuxième est optique et utilise l'effet Sagnac⁴. Deux faisceaux de lumière laser d'intensité équivalente, obtenus grâce à un séparateur, parcourent en sens opposés une fibre optique enroulée selon un anneau de rayon R . Lorsque cet enroulement subit un mouvement de rotation autour de son axe, le faisceau qui parcourt la fibre dans le sens de la rotation, a un temps de propagation plus long que celui qui la parcourt dans le sens inverse. Ce capteur possède une bande passante élevée (100 à 1000 Hz), une dérive indépendante de l'accélération avec une insensibilité aux conditions ambiantes.

3. Dans un système de référence (référentiel) en rotation uniforme, les corps en mouvement, tels que vus par un observateur partageant le même référentiel, apparaissent sujets à une force d'inertie perpendiculaire à la direction de leur mouvement [CLEVACTI, 2009]. Cette force est appelée force de Coriolis.

4. L'effet Sagnac désigne un phénomène physique représenté par le décalage temporel entre deux signaux lumineux parcourant la circonférence d'un disque et émis en même temps dans un sens opposé depuis un émetteur-récepteur fixé à ce même disque tournant [Zazou, 2009].

4.4.1.4 La centrale inertielle

Bien que les premiers systèmes de capteurs inertiels se soient développés durant les années 1900, la fabrication de centrales inertielles fait encore parfois partie de prototypes de laboratoire [Luo, 2002]. Pour réaliser une centrale inertielle, des gyroscopes, des accéléromètres (type asservi) et un calculateur sont intégrés au sein d'un même composant. Sur un axe donné, les gyroscopes mesurent l'angle de rotation et les accéléromètres, l'accélération. Avec six capteurs (trois de chaque) disposés de manière à ce que les axes des capteurs forment un repère orthogonal et un calculateur embarqué, la position dans le repère cartésien est facilement définie.

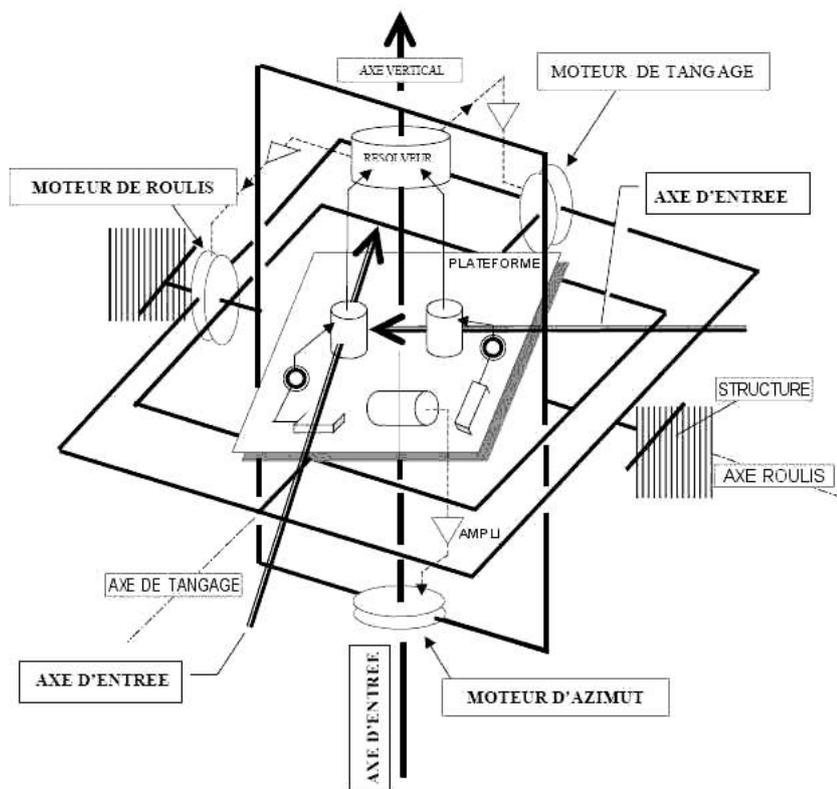


FIGURE 4.21 – Présentation d'une centrale inertielle.

Cependant, des recherches portent déjà sur la fabrication de centrales inertielles sans utilisation de gyroscopes. Ils sont remplacés par trois accéléromètres qui sont disposés d'une manière très précise [Tan et al., 2000].

Ces produits restent chers. Le développement de l'utilisation de ces centrales dans les équipements tels que les avions, les navires, les robots devraient engendrer une diminution des prix.

4.4.2 Les capteurs extéroceptifs

Le véhicule se repère grâce à un dispositif installé sur le véhicule et dans l'environnement. L'association des deux éléments situe le véhicule.

4.4.2.1 Les aimants et le magnétomètre

Les dispositifs à base d'aimants (ou magnets) étudient le champ magnétique rayonné par ce dernier. A la manière de l'étude du champ magnétique terrestre (paragraphe 4.3.3.2 page 33), il est nécessaire d'utiliser un capteur à champ magnétique fixé sur le véhicule. Il s'installe sous la voiture. Dans l'enrobé, de la matière ferromagnétique est incorporée soit sous forme d'un ruban (comme une bande audio) soit de manière disparate (4.22) [Chan *et al.*, 2002]. Le système présenté dans le paragraphe 4.3.3.2 utilise le métal du véhicule pour effectuer des mesures. Dans le cas présent, le magnétomètre repère les variations du champs magnétique terrestre engendrées par cette matière ferromagnétique. Ce système permet un positionnement précis à 5 mm si le capteur et l'émetteur magnétique sont proches, et de 2 à 3 cm s'ils sont espacés de 30 cm.

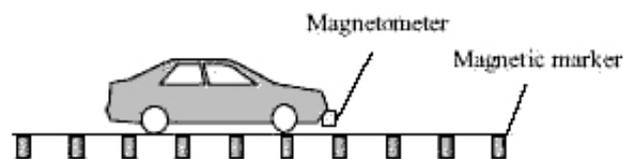


FIGURE 4.22 – Système de localisation à base de magnets.

Le programme américain PATH de l'université de Berkeley étudie les aimants depuis de nombreuses années.

4.4.2.2 Le filoguidage

Le filoguidage est une technique permettant de suivre une ligne préalablement tracée. Elle peut prendre la forme d'un fil électrique parcouru par un courant ou bien d'une simple ligne de couleur. Cependant, la technique par induction est beaucoup plus fiable car elle n'est pas soumise au problème du vieillissement de la couleur, de la saleté...



FIGURE 4.23 – Guidage par un fil lumineux d'un véhicule minier de 50 tonnes.

Le véhicule suit la ligne posée. Dans le cas d'un dispositif inductif, le fil est parcouru par un courant alternatif. C'est donc un circuit fermé. Généralement, la fréquence du signal est de

dix kilos-hertz. Deux bobines, placées de chaque côté du véhicule et de manière à capter le maximum de flux électromagnétique émis par le fil, servent à sa localisation le long de la ligne. Grâce à ces bobines, une tension induite est créée, permettant par comparaison des tensions des deux capteurs, de situer le véhicule.

Néanmoins, il faut veiller à ce que le circuit ne soit pas rompu. La précision obtenue est de l'ordre de 5 cm.

4.4.2.3 L'identification par radiofréquence

Le terme *Radio Frequency IDentification (RFID)* trouve parfois la dénomination de *contact-less identification*. Cette technologie utilise les ondes radio et est déjà largement utilisée pour reconnaître ou identifier, à plus ou moins grande distance (de quelques centimètres à plusieurs mètres) et dans un minimum de temps, un objet, un animal ou une personne portant une étiquette capable d'émettre des données.

L'interrogateur est un dispositif composé d'un lecteur et d'une antenne. L'étiquette (également appelée tag ou transpondeur) est caractérisée par un numéro d'identifiant, lequel est unique pour chaque tag. Celui-ci, en fournissant son identifiant par ondes radio fréquences, peut donc être reconnu. L'étiquette est formée par une puce électronique et une antenne. Il existe deux types de technologie RFID. Celle dite passive dans laquelle le tag ne possède pas d'émetteur, et celle dite active dans laquelle le tag contient un émetteur. Si une batterie est présente sur l'étiquette, alors il est dit *battery assisted*. Dans le cas contraire, il est télé-alimenté.

Il existe quatre gammes de fréquences utilisées pour que le tag communique avec son lecteur [France, 2004] : (a) basses fréquences : 125 kHz à 150 kHz ; (b) hautes fréquences : 13,56 MHz ; (c) UHF : 300 MHz à 900 MHz ; (d) SHF⁵ : 2,45 et 5.8 GHz. L'utilisation de la fréquence déterminera la vitesse de lecture écriture ainsi que la portée du signal.

Dans [Plainchault, 2005], il est montré comment utiliser cette technologie dans le domaine de la prévention routière. La précision du système sur le positionnement latéral est estimée à 5 cm.

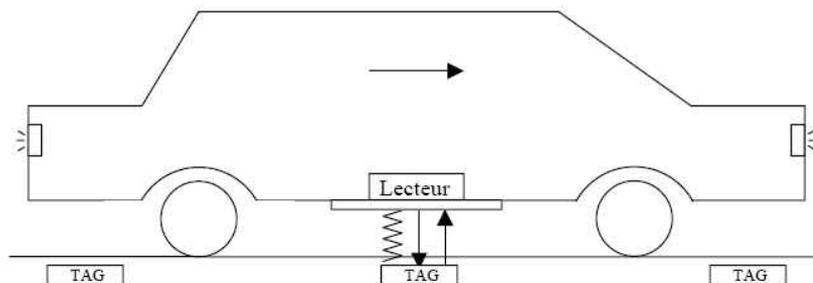


FIGURE 4.24 – Application d'un système RFID pour la prévention routière.

5. Ultra Haute Fréquence ou *Ultra High Frequency (UHF)*, Supra-Haute Fréquence ou *Super High Frequency (SHF)*.

Cette technologie sans contact est en pleine expansion dans de nombreux domaines comme l'automobile ou la traçabilité [Sheffi, 2004].

4.4.2.4 Les balises actives

Présentation

Elles forment un dispositif constitué de balises émettant ou réceptionnant un signal et d'un système disposé sur le mobile à localiser et doté du système complémentaire aux balises. Celles-ci sont positionnées à des emplacements connus dans notre environnement. La plupart de ces systèmes sont soit à ultrasons, soit laser.

La mesure de la position s'effectue par trilatération (mesure de distance) ou triangulation (mesure d'angle). Dans le cas d'utilisation de balises à ultrasons par exemple, les conditions météorologiques influencent la qualité du système. L'avantage d'un tel système est le taux d'échantillonnage élevé. La difficulté à disposer les balises avec précision et le coût d'installation et de maintenance constituent des inconvénients à leur utilisation. Dans des zones de moins de 35 m², une précision inférieure à 10 cm est observée.

Des systèmes plus récents, bâtis sur un protocole réseau sans fil comme le Wi-Fi ou le Zigbee, utilisent la puissance du signal électromagnétique détectée lors de l'échange d'informations avec différents éléments présents sur le réseau. L'utilisation de la trilatération permet de localiser les différents éléments constituant le réseau. Chaque élément est capable d'émettre et de recevoir des informations sur le réseau afin de répondre à des requêtes. Parmi ces éléments, certains ont une position définie et d'autres sont calculés à partir de la position de ceux qui sont définies.

Le plus connu de ces systèmes, en raison de la démocratisation d'appareil du même nom, est le système *Global Positioning System (GPS)*.

Le système de navigation global par satellite

Le *Global Navigation Satellite System* ou *Système de Navigation Global par Satellite (GNSS)* englobe tous les types de systèmes de navigation par satellite. Ce système est composé de plusieurs satellites en orbite autour de la terre. Quatre satellites au minimum doivent être visibles en permanence pour assurer un positionnement précis. Tous les satellites suivent une trajectoire constante, prédéterminée et précise. Chacun d'eux embarque une horloge atomique. Cette heure d'une extrême précision est transmise au récepteur terrestre qui connaît toutes les orbites des satellites. Les coordonnées précises de tous les satellites sont calculées en connaissant la vitesse de propagation dans l'air du signal. Deux points sont identifiés par les coordonnées de trois satellites : un sur la terre et un autre incohérent. Le quatrième satellite affine les mesures. En effet, le récepteur ne disposant pas d'une horloge atomique, une erreur d'une seconde entraîne un décalage d'une distance de 300 000 km...

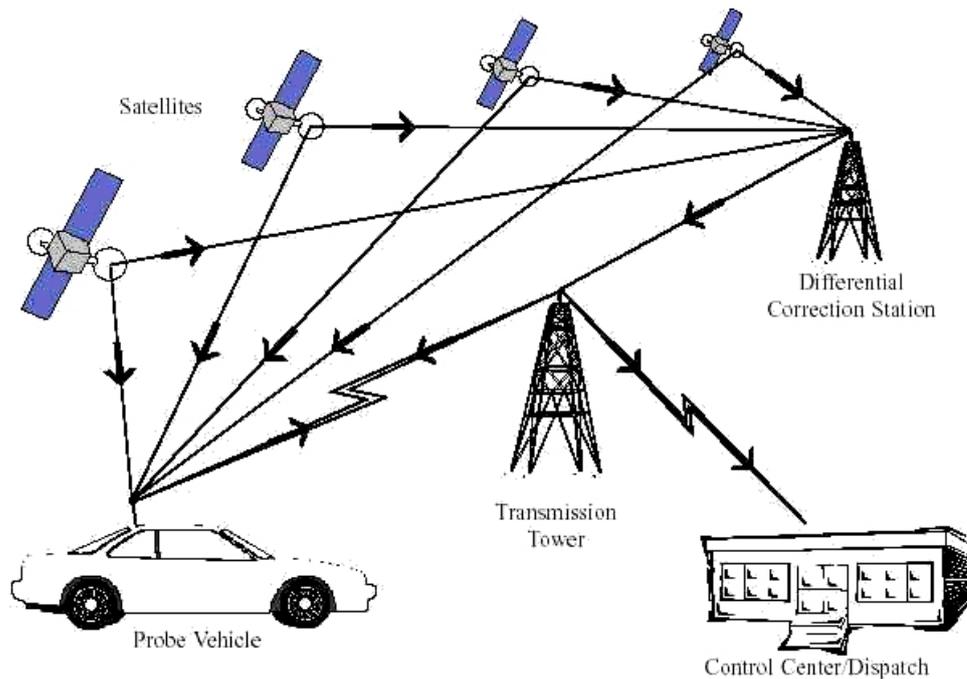


FIGURE 4.25 – Positionnement par GNSS.

A l'heure actuelle, le système américain, GPS, comprend au moins 24 satellites opérationnels depuis 1995. Le système européen, Galiléo, en comprendra 30 et devrait proposer plus de bandes de fréquences que son homologue américain avec une meilleure opérabilité en zone urbaine. D'après les prévisions, Galiléo sera complètement opérationnel en 2013. Le système Russe GLONASS comprendra 24 satellites d'ici la fin 2009.

Les estimations actuelles montrent qu'une précision d'un mètre s'obtient aisément. Pour améliorer cette précision, il faut utiliser des stations de référence qui fonctionnent de la même manière qu'un récepteur mais qui présentent la particularité de posséder une position précise et bien définie. L'erreur de mesure s'exprime comme la différence entre la valeur réelle et la valeur connue. Cette différence sert à affiner la précision des récepteurs. Cette technique s'appelle le GPS Différentiel ou *Differential GPS (DGPS)* [Duquenne *et al.*, 2005].

La mesure de la vitesse s'opère en mesurant le temps séparant deux positions successives. La erreur de la mesure est inférieure à 2 %.

4.4.2.5 Les repères passifs

Deux types de repères passifs existent : les balises passives et les amers.

A l'instar des balises actives, les balises passives réfléchissent uniquement le signal provenant d'un système de mesure comme par exemple un miroir. Ces balises peuvent également comporter des informations plus évoluées (codes-barres). Leurs positions doivent être connues avec précision et être facilement identifiables par rapport à l'environnement.

Les amers sont des repères intégrés dans l'environnement qu'un mobile peut reconnaître aisément grâce à des capteurs extéroceptifs. Ces éléments existent déjà dans l'environnement. Leur fonction première est différente de la localisation d'un mobile. Cependant, leur détection et leur identification peuvent être plus difficiles et les risques d'ambiguïté ou de fausses détections plus élevés. Le plus souvent, le capteur utilisé est un caméra. L'avantage de ce type de repères par rapport aux balises actives est son faible coût. Leurs inconvénients sont la portée réduite et la difficulté d'identification. Cette technique est utilisée plus particulièrement dans des enceintes closes et réduites.

4.4.2.6 L'utilisation d'un modèle

Dans ce cas, l'environnement est préalablement connu et numérisé. Ainsi, il suffit d'obtenir par un système quelconque, quelques points de référence pour se repérer. La mise en correspondance entre les différents éléments repérés localise l'utilisateur en définissant sa position et son orientation.

La précision de cette méthode dépend de la capacité du système à évaluer les détails de l'environnement et de la précision de la carte. Pour de bons résultats, il est également nécessaire d'avoir une carte de l'environnement à jour. Le temps de repérage du système dépendra de la capacité du processeur à effectuer l'algorithme [Borenstein *et al.*, 1997].

4.4.2.7 L'utilisation des téléphones portables

Cette technique est pour le moment étudiée dans le nord de l'Amérique (Etats-Unis et Canada) sous le nom anglais de « Floating Car Data ». Il s'agit de repérer les téléphones portables en service grâce aux différents réseaux cellulaires (*Code Division Multiple Access (CDMA)*, *Global System for Mobile communications (GSM)*, *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)*, *General Packet Radio Service (GPRS)*). Cependant, d'après les résultats indiqués dans [Yim et Cayford, 2001], l'imprécision et l'incertitude sur les mesures sont très élevées. Cette technique emploie généralement la triangulation. Les résultats sont pour le moment très approximatifs. Elle n'est donc pas encore applicable, pour le moment, au suivi de trajectoire. Néanmoins, pour une gestion de trafic, elle peut s'avérer suffisante [Klein, 2001]. Son principal inconvénient réside dans l'utilisation des téléphones portables allumés. Or tout le monde ne possède pas de téléphone portable et ne le laisse pas allumer en voiture.

5.

Bilan

Dans ce chapitre, nous avons présenté des capteurs et des méthodes pour pouvoir se repérer dans un environnement et permettre au fur et à mesure de la progression d'un véhicule, de reconstruire les caractéristiques de sa trajectoire. Il est nécessaire de bien préciser les spécifications de notre application pour sélectionner les bons capteurs. Des capteurs passifs à ultrasons ou infrarouges sont peu onéreux vis-à-vis des autres capteurs. Cependant, si l'application demande de mesurer des vitesses dans une grande zone de surveillance, la multiplication des capteurs nécessaires, leur mise en place du réseau et leur maintenance accroissent considérablement le coût du dispositif. De plus, certains systèmes, comme les capteurs acoustiques, magnétiques ou certaines catégories de radars, requièrent une vitesse minimale pour que celle-ci soit mesurée. Le tableau 5.1 présente un récapitulatif des différents capteurs. Une synthèse a été présentée dans [Aubin *et al.*, 2006b]. Dans ce tableau, V indique la vitesse, t le temps, x la position latérale et y la position longitudinale du véhicule sur la chaussée. Le symbole « X » dans la colonne « Intrusif » précise si la technologie concernée est non intrusive pour le conducteur. Cela signifie que le conducteur n'a pas conscience de la présence de ladite technologie.

Technologies	Informations	Intrusif	Avantages	Inconvénients
Pneumatique	V, t		Faible coût. Technologie maîtrisée.	Génération de bruit lors du passage des véhicules sur les tuyaux pneumatiques. Usure prématurée s'il est installé dans des zones d'accélération ou de freinage. Zone de mesures à sélectionner avec attention.
IR passif	V, t		Détection passive.	Sensibilité météorologique. Mauvaise précision.

5 : Bilan

IR actif	V, t, x, y		Multitude d'informations.	Si les véhicules sont trop sombres, ils échappent à la détection. Le système repose sur un émetteur et un récepteur dans le même boîtier. Alignement précis de l'émetteur et du récepteur (pose délicate). Sensible aux conditions météorologiques et à la sur-intensité lumineuse.
Ultrasons	V, t, x, y		Très utilisé au Japon donc technologie connue.	Les conditions météorologiques influent sur la précision. En effet, la vitesse du son n'est pas constante lors des changements de température, de pression ou de pluviométrie.
Capteur Acoustique passif	V, t		Détection passive.	Sensible à la température. Problème de détection si le véhicule est trop lent.
Magnétique	V, t	X	Petite taille. Peu onéreux.	Ne détecte pas les véhicules roulant trop lentement. Surface de détection souvent faible. Bruit sur les mesures. Ne permet pas de faire de la classification de véhicule. Détection sur plusieurs voies impossible.
Radar	V, t, x, y		Richesse des données collectées. Mesure directe de la vitesse. Insensibilité aux conditions météorologiques.	Une maintenance régulière pour vérifier la bonne orientation du radar est nécessaire. Le remplacement des sources, qui se dégradent dans le temps, est nécessaire. Un faible angle d'ouverture limite la zone surveillée. Un simple radar doppler ne détecte pas les véhicules arrêtés.
Piézoélectrique	V, t, y	X	Robuste et fiable. Bande passante. Mesure également le poids.	Sensibilité à la température.

Capacitif	V, t, y	X	Insensibilité aux variations de température. Insensibilité à la météo. Mesure également le poids.	Prix. Durée de vie.
Fibre optique	V, t, y	X	Insensibilité à la météo et aux champs électromagnétiques. Bande passante élevée. Mesure également le poids. Précis.	Prix.
Boucles	V, t, x, y	X	Grande flexibilité dans la mise en œuvre du dispositif. Technologie maîtrisée. Précision bien meilleure que les autres systèmes. Insensibilité à la météo.	Coût supplémentaire de génie civil pour l'insertion du dispositif dans la chaussée. Sensible à la température.
Vidéo	V, t, x, y		Mesures possibles sur plusieurs voies. Large couverture de zones.	Mise en place de l'équipement très chère. Difficultés en cas de pluie, brouillard, neige.
RFID	V, t, x, y		Insensibilité à la météo. Possibilité de transférer des informations.	Coût. Sensibilité aux ondes électromagnétiques.
Filoguidage	x		Véhicule reste sur un circuit donné.	Pauvreté de l'information.
Aimants	V, t, x, y		Insensibilité à la météo.	Durée de l'information contenue dans les aimants.
Odomètre	V, t, x, y		Coût financier faible. Haut niveau d'échantillonnage de la mesure. Bonne précision à court terme. Grande facilité de mise en œuvre.	Imprécision à long terme. Problème quand le véhicule patine ou quand les roues ne sont plus en contact avec le sol.
GNSS	V, t, x, y		Insensible aux variations météorologiques.	Problème quand les satellites ne sont pas visibles. Les mesures ne sont pas assez précises pour faire du positionnement en temps réel.

5 : Bilan

Téléphonie	V, x, y		Pas d'investissement dans un nouveau capteur.	Imprécis.
Accéléromètre	V, t, x, y		Pas d'alimentation.	Imprécisions dues aux intégrations successives.

Tableau 5.1 – Tableau présentant les avantages et inconvénients des différents capteurs et l'information mesurée.

Pour notre application, nous souhaitons des systèmes mesurant la trace décomposée en des mesures de positions longitudinales et latérales avec une précision de 1 cm et une mesure de vitesse à 5 km/h près. L'ensemble du dispositif utilisé doit présenter un caractère non intrusif pour le conducteur, fonctionner sur le réseau routier de manière indépendante par rapport aux variations météorologiques, être peu onéreux et adapter à l'ensemble du parc automobile.

La vidéo ressort comme le système à privilégier après comparaison entre les systèmes selon les critères suivants : la facilité de l'implantation, le coût du produit maintenance incluse, la durabilité, la facilité de collecte des données, la précision, l'impact des conditions météorologiques sur la précision et la maturité de la technologie du dispositif [[AeroSys et al., 1995](#)]. Néanmoins les caméras ont été écartées dès le début de façon à éviter toute modification d'attitude du conducteur lorsque celui-ci aperçoit le dispositif. De plus, ces caméras ont des performances très réduites en cas de fonctionnement dans un environnement météorologique dégradé et les précisions obtenues ne correspondent pas à nos besoins. Les systèmes embarqués nécessitent l'installation de capteurs sur le véhicule. L'étude d'une population entière n'est donc pas réalisable à l'heure actuelle. Cependant la percée des systèmes GNSS et des téléphones portables présentent des perspectives intéressantes. Reste également à savoir si la qualité des mesures sera à la hauteur des besoins, si les usagers de la route auront ces dispositifs allumés et si l'accès à ces informations sera possible. Les boucles électromagnétiques semblent être un compromis intéressant à condition de ne pas rechercher une précision inférieure à 10 cm et de ne pas installer ce capteur dans un environnement perturbé par des champs électromagnétiques (exemple : les lignes à haute tension).

D'après nos exigences, un capteur de métrologie de trajectoire a donc toute sa place. Pour mieux cerner le problème de suivi de trajectoire, il faut également prendre en compte tous les problèmes de délestage et d'adhérence. Les capteurs permettant la mesure de ces caractéristiques identifieraient avec plus de précision la position du véhicule sur la route, et amélioreraient les techniques de reconstruction de la trajectoire et la prévision du comportement de l'utilisateur. L'équipement seul de la chaussée ne permet pas la récolte de ces informations.

Le coût de maintenance et de mise en place de chaque dispositif n'a pas été abordé. La durée de vie d'un système est également toujours difficile à apprécier. Ces paramètres dépendent de la durée de l'étude, de la rentabilité du système, des performances voulues mais également des frais annexes (difficulté d'accès, gestion de l'énergie, gestion de l'espace...) qui viennent s'ajouter à l'achat du capteur. Une étude commanditée par le gouvernement américain indique ces différents coûts [[AeroSys et al., 1995](#)]. De plus la qualité du capteur varie selon les constructeurs.

Par ailleurs, l'environnement d'installation influe sur son bon fonctionnement. Par exemple un capteur piézo-électrique peut très bien fonctionner six mois sur une route donnée et dix ans sur une autre. La chaussée peut s'être déformée ce qui engendre un dommage sur le capteur. Les conditions climatiques peuvent influencer sur les résultats.

L'amélioration de la sécurité routière, notamment sur le réseau secondaire, nécessite de nouveaux capteurs fiables, robustes, peu chers, autonomes, y compris en énergie afin d'informer les conducteurs ou les gestionnaires d'infrastructure (DDE, Conseils Généraux, ..) sur des zones accidentogènes. Faute de disposer de l'outil idéal qui permettrait de suivre en continu la trajectoire des véhicules, nous proposons d'étudier deux capteurs innovants mis au point dans le laboratoire de l'ESEO afin de répondre à nos besoins étudiés dans la troisième partie de ce chapitre (page 15). Le premier est un capteur optique et le second est un capteur résistif. Par la suite, l'objectif est de mettre en place ces capteurs répartis dans l'infrastructure (capteurs ponctuels mesurant la position latérale et la vitesse des véhicules). Ces deux dispositifs sont présentés et évalués dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Capteurs de position innovants

6.

Présentation

6.1 Objectifs

La littérature ne décrit pas de capteurs permettant à la fois de localiser un véhicule avec une précision de 1 cm et de mesurer la vitesse à 5 km/h près. Mesurer avec une précision semblable la position latérale du véhicule sur la chaussée constitue la limite des systèmes actuels. Nos besoins nous ont amenés à étudier et à concevoir deux nouveaux capteurs : un capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg et un capteur résistif novateur. Ces deux capteurs, développés au sein du Centre d'Etude et de Recherche (CER) de l'ESEO, répondent à cette même problématique. Cependant, ces capteurs diffèrent dans leur réponse aux contraintes. Ces capteurs sont installés dans la chaussée de la route.

Ces deux capteurs ont une longueur bien supérieure à leur largeur et à leur épaisseur (chaque facteur est au moins supérieur à 50). Ces dimensions permettent de les considérer comme des fils de diamètre négligeable. La mesure de la position est donnée suivant l'axe longitudinal des capteurs, c'est-à-dire le long du fil. Ils sont sensibles à une contrainte transmise, dans notre cas d'étude, par le poids du véhicule. La déformation mécanique de la chaussée suite au passage du véhicule entraîne une déformation du capteur à partir duquel il est possible de déterminer la position physique du véhicule.

Chaque capteur donne prioritairement une information de position. L'installation de deux capteurs espacés d'une dimension connue fournit la vitesse du véhicule à partir de la mesure du temps séparant le passage de ce véhicule sur chaque capteur.

Nous nous intéresserons tout d'abord à la mesure de la position d'un objet présent sur ces capteurs le long de leur axe longitudinal. Différentes techniques optiques ont été étudiées pour repérer la position dans nos recherches : réflectométrie temporelle Raman, réflectométrie temporelle Brillouin, réseaux à conversion modale [Lequime, 1997], disposition particulière (géométrie de la fibre), EFPI [Xiao, 2000], les résonateurs Fabry-Perot [Lee *et al.*, 2001], par une

modulation en fréquence du laser puis en détectant la phase entre l'onde émise et l'onde reçue [Gatet et Tap-Béteille, 2009]. Cependant, les perspectives annoncées - la mesure de la position, du poids et de la vitesse d'un véhicule - par un seul capteur à réseaux de Bragg ont permis d'orienter notre choix. Par ailleurs, ce capteur n'a pas encore été testé pour ce type d'application et l'usage d'un capteur fibré présente des avantages indéniables comme le faible encombrement du capteur, le temps de réponse rapide. Ces avantages sont exposés dans le paragraphe 7.1.3 page 58. Néanmoins des inconvénients, que nous détaillerons par la suite, nous ont amenés à réfléchir sur un deuxième capteur plus simple et moins onéreux. Les chapitres suivants présentent et expliquent leurs principes de fonctionnement : le capteur à réseaux de Bragg (chapitre 7) puis le capteur résistif (chapitre 8).

Chaque système étant étudié pour recueillir le positionnement d'un véhicule sur une route, les systèmes d'acquisition des différents capteurs doivent respecter une fréquence d'échantillonnage minimale. Une étude a préalablement été menée pour déterminer cette fréquence.

6.2 Généralités sur les systèmes d'acquisition

Pour déterminer la fréquence d'acquisition nécessaire, il faut connaître la fréquence du signal à échantillonner. Dans un cas classique de configuration du réseau routier secondaire, la vitesse maximale autorisée est de 90 km/h, soit 25 m/s. Le contact au sol d'une voiture classique qui roule à cette allure correspond à un rectangle dont la longueur est de 15 cm. Ainsi, sans glissement ni rebond, un point de la roue reste 6 ms en contact avec la chaussée. D'après Shannon, une fréquence d'échantillonnage à 334 Hz est donc nécessaire puisque le signal donné varie à une fréquence de 167 Hz.

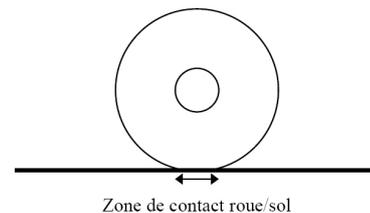


FIGURE 6.1 – Représentation de la surface de contact entre la roue et le sol.

Dans des cas extrêmes de conduite, la surface de contact de la roue avec le sol peut être considérée comme un rectangle de 9 cm de long. Cette longueur est donnée pour des roues présentes sur des remorques de petite taille et se déplaçant à la vitesse de 162 km/h soit 45 m/s. La fréquence d'échantillonnage est alors définie à 1 kHz. Nous prendrons cette situation pour définir notre fréquence d'acquisition.

7.

Le capteur à réseaux de Bragg

Les caractéristiques relatives à la fibre optique sont décrites dans l'annexe A.

7.1 Les capteurs à fibre optique

7.1.1 Définition

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

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

Dans un capteur à fibre optique, une gaine mécanique est souvent ajoutée à la fibre lui offrant une protection supplémentaire et servant de conditionnement (permettant la première transformation de la mesurande vers la grandeur électrique).

7.1.2 La récupération de l'information

Deux possibilités existent pour acquérir l'information d'une fibre :

- par **transmission** : une source émet un signal lumineux dans la fibre optique de transmission. Ce signal traverse le capteur (ou les capteurs dans le cas de multicapteurs) puis une nouvelle fibre de transmission avant d'arriver au détecteur ;

- par **réflexion** ou **rétrodiffusion** : une source émet un signal lumineux dans la fibre optique de transmission. Ce signal traverse le capteur (ou les capteurs dans le cas de multicapteurs) à fibre optique qui réfléchit ou rétrodiffuse ce signal. Le détecteur se situe donc à côté de la source.

7.1.3 Les avantages et inconvénients des capteurs à fibre optique

Les capteurs utilisant au moins une fibre optique ont un véritable potentiel d'avenir. Ceci est dû à ses nombreux avantages :

- une insensibilité aux perturbations électromagnétiques ;
- une isolation électrique entraînant une plus grande sécurité dans son fonctionnement et dans son installation ;
- un temps de réponse rapide ;
- un poids faible par rapport au cuivre notamment ;
- une large plage de mesures possibles ;
- une mesure pouvant être sans contact et sur une longue distance ;
- une absence d'alimentation au point de mesure.

A ces avantages s'ajoutent les atouts intrinsèques liés à l'utilisation de la fibre optique tels que la communication bidirectionnelle ou la faible perte du signal (paragraphe A.5).

Les inconvénients sont notamment les pertes engendrées par la courbure de la fibre et la fragilité des connecteurs. Par ailleurs, la mesure s'effectue nécessairement par contact.

7.1.4 Les techniques de mesure

Les capteurs fibrés offrent une grande diversité de mesure telle que la position, le déplacement, la température, la pression, les contraintes, le débit, les rotations, les champs magnétiques acoustiques et électriques.

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

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

7.1.5 Les réseaux de capteurs optiques

Le terme de « réseau » est employé pour qualifier un ensemble de capteurs à fibre optique.

Trois topologies de réseau existent [Lequime, 1997] :

- le réseau échelle : les capteurs sont positionnés en parallèle ;
- le réseau linéaire : les capteurs sont agencés en série ;
- le réseau étoile ou à arborescence : les capteurs sont reliés à un dispositif qui sépare la lumière équitablement dans plusieurs voies.

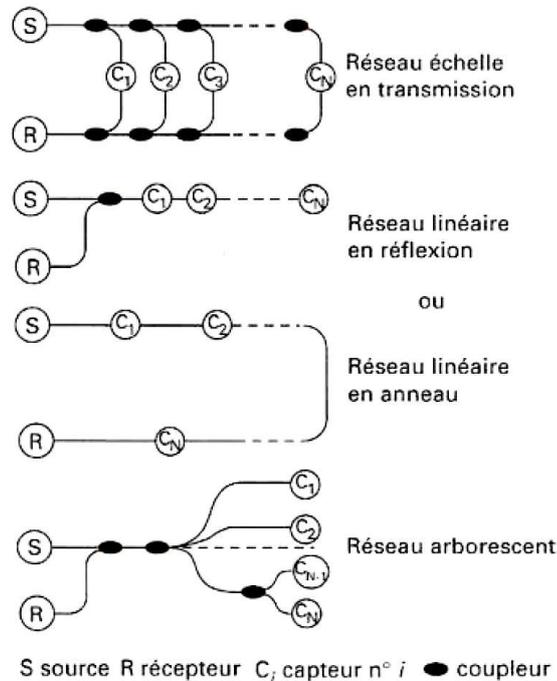


FIGURE 7.1 – Quelques topologies de réseaux.

7.2 Le réseau de Bragg

7.2.1 Le principe

Un réseau de Bragg est un filtre spectral directement photo-inscrit dans le coeur de fibre optique. Il est composé d'un réseau de diffraction. A la base, ces réseaux sont utilisés pour leurs propriétés linéaires. En spectroscopie par exemple, les réseaux de diffraction permettent de disperser les composantes spectrales de la lumière émise par différentes sources. Selon le sens de lecture de l'information, il sert par analogie à l'électronique de filtre passe-bande (entrée) ou de filtre réjecteur de bande (sortie). Chaque réseau de Bragg est associé à une longueur d'onde de Bragg qui le caractérise. Cette longueur d'onde représente la longueur d'onde centrale qui est réfléchiée. En réalité, le spectre réfléchi possède une bande passante étroite précisée dans la suite de ce document (7.2.5). Sur la figure 7.2, une source émet de la lumière dans tout le spectre du visible à l'intérieur d'une fibre possédant un réseau de Bragg dont la longueur d'onde centrale λ_B est située dans l'orange. A la sortie de la fibre (en transmission), tout le spectre est transmis à l'exception de λ_B qui est réfléchi.

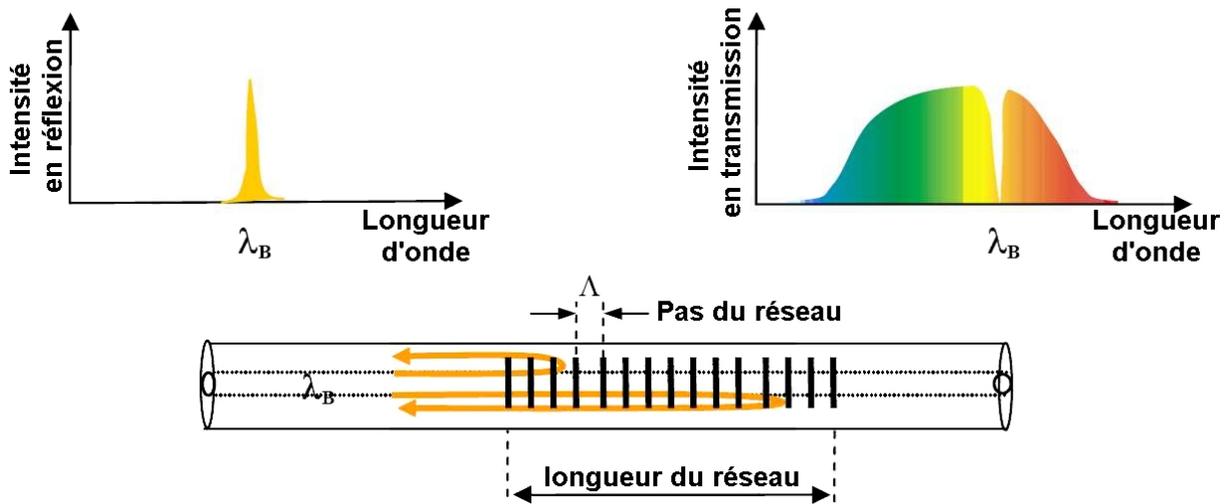


FIGURE 7.2 – Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg.

Les réseaux de Bragg sont déployés suivant deux axes :

- les systèmes de transmission de données ;
- les capteurs.

Quel que soit l'axe choisi, la technologie et les composants utilisés sont identiques. Dans les systèmes de communication, les débits ne cessent de croître. Les réseaux de Bragg jouent un rôle majeur dans la séparation des signaux multiplexés en longueur d'onde (codage *Wavelength Division Multiplexing (WDM)*) dans les télécommunications [Verneuil, 2003]. Ultérieurement, la partie concernant les capteurs est plus étudiée. Le réseau de Bragg est un réseau de diffraction dans une fibre optique.

7.2.2 Le réseau de diffraction

En optique géométrique, un réseau est un milieu dont les propriétés varient périodiquement dans l'espace, d'un pas Λ . Il arrive qu'il soit défini par le nombre de traits par unité de longueur. Le pas est la distance physique séparant deux points homologues de deux zones consécutives de même indice [Queyrel et Mesplède, 1996]. Les réseaux de Bragg sont issus de la théorie des réseaux de diffraction.

Un faisceau parallèle de lumière monochromatique de longueur d'onde λ rencontre un réseau plan dans l'air. Ce réseau plan est constitué de N traits ayant une largeur b , soit $N - 1$ fentes. Cette onde a une pulsation ω . Elle arrive avec un angle d'incidence i et est diffractée selon un angle i' . L'onde incidente suit son vecteur d'onde $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u}$, \vec{u} représentant le vecteur unitaire de la direction de l'onde incidente et l'onde diffractée suit le vecteur unitaire \vec{u}' selon son vecteur d'onde $\vec{k}' = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{u}'$.

Chaque fente va diffracter dans la direction i' une onde. Toutes ces ondes diffractées par les différentes fentes vont interférer dans la même direction (interférence constructive). Seules leurs phases changent.

Les maxima d'intensité des ondes diffractées sont atteints quand :

$$\sin(i') = \sin(i) + q \frac{\lambda}{a} \quad (7.1)$$

La relation 7.1 constitue la formule des réseaux qui montre que toutes les ondes diffractées suivant un angle i' se recombinent suivant le principe des interférences constructives si la différence de chemin optique ($a \cdot (\sin(i') - \sin(i))$) est un multiple q de la longueur d'onde. L'ordre q appartient à \mathbb{Z} [Queyrel et Mesplède, 1996].

7.2.3 Du réseau de diffraction au réseau de Bragg

Hill a découvert la photosensibilité des fibres optiques en 1978. Il étudiait la transmission d'une onde provenant d'un laser argon ionisé de longueur d'onde $\lambda_{argon} = 488nm$ dans une fibre optique (monomode de type germanosilicate), quand, après un certain temps, le signal transmis a subi une perte [Hill et Meltz, 1997], [Hill, 2000]. Une partie du signal réfléchi en bout de fibre optique a engendré la création d'un réseau de diffraction qui a réfléchi la longueur d'onde de la formule 7.1, soit ici λ_{argon} . Cette longueur d'onde est appelée longueur d'onde de Bragg (λ_b) en référence aux travaux de Sir Lawrence Bragg en 1912 sur l'interprétation des figures de diffraction X des réseaux cristallins. Cette caractéristique a été exploitée par la suite pour développer les réseaux de diffraction sur fibres optiques, servant à la constitution de filtres et de capteurs.

Dans une fibre optique d'indice n , l'onde incidente arrive avec un angle $i = \frac{\pi}{2}$ par rapport au réseau photo-inscrit transversalement par rapport à l'axe de propagation de la fibre. L'équation 7.1 devient alors :

$$n(\sin(i') - \sin(i)) = q \frac{\lambda}{a} \quad (7.2)$$

En considérant la constante de propagation $\beta = n_{eff} \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$, l'équation 7.2 se transforme en :

$$\beta_{diffracte} = \beta_{incident} + \frac{2\pi q}{\Lambda} \quad (7.3)$$

avec l'indice effectif $n_{eff} = n \cdot \sin(i \text{ ou } i')$

Pour une onde réfléchie, $i' = -i = -\frac{\pi}{2}$ et l'ordre réduit vaut -1. Ainsi la longueur d'onde réfléchie vaut :

$$\lambda_b = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (7.4)$$

L'onde est réfléchiée lorsque toutes les réflexions élémentaires sont en phase, c'est-à-dire, quand la distance entre deux filtres est égale à la demi-longueur d'onde dans le milieu (ce qui est traduit par l'équation 7.4). Les autres longueurs d'onde ne validant pas la condition d'accord de phase se propagent suivant la direction de l'onde incidente ($q = 0$). Le réseau agit comme un miroir réfléchissant une longueur d'onde, sélectionnée par la constitution du réseau [Hill *et al.*, 1978], [Morey *et al.*, 1989].

7.2.4 La fabrication d'un réseau de Bragg

Les réseaux sont fabriqués par interférence. Des montages interférométriques permettent de photo-inscrire le réseau en utilisant par exemple un miroir de Lloyd [Meltz *et al.*, 1989]. Le réglage de l'interfrange permet de régler le pas du réseau. La fabrication se fait également à travers un masque de phase (réseau de diffraction) 7.3. La diffusion d'hydrogène permet l'augmentation de la sensibilité du coeur de la fibre [Lemaire *et al.*, 1993]. Le pas du réseau est inférieur au micromètre. Les fibres ont une photo-sensibilité plus forte dans le domaine des ultraviolets ce qui explique l'utilisation de ces longueurs d'onde pour réaliser la photo-inscription.

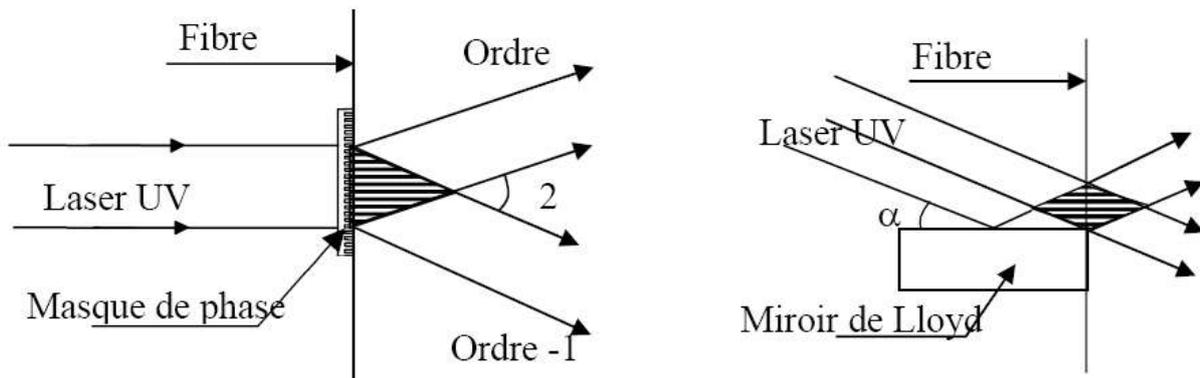


FIGURE 7.3 – Inscription des réseaux de Bragg par masque de phase (à gauche) ou par interférométrie (miroir de Lloyd à droite).

7.2.5 La réflexion du réseau de Bragg

En réalité, la réflexion du réseau n'est pas parfaite. Sa réflectivité est définie dans [Hill et Meltz, 1997] comme :

$$R = \tanh^2\left(\frac{\pi \Delta n_{eff} L}{\lambda_b}\right) \quad (7.5)$$

avec L étant la longueur du réseau et Δn_{eff} la modulation d'indice effectif.

Un réseau de Bragg ne renvoie également pas une seule longueur d'onde mais un spectre présentant plusieurs longueurs d'onde ayant une bande passante centrée sur la longueur d'onde

centrale de Bragg. Le spectre du signal réfléchi n'est pas composé d'une seule raie. Des profils ont été développés pour parfaire ce spectre. Leurs caractéristiques font varier non uniformément la modulation de l'indice effectif (figure 7.4), dans le but de diminuer les lobes secondaires (profil apodisé), d'augmenter la réflectivité de la longueur d'onde centrale de Bragg et d'augmenter la bande passante réfléchie (profil à pas variable « chirpé »)... [Chi Shing, 2005]. Lors de sa conception, la fibre optique peut subir une rotation. Cette rotation limite les dispersions de polarisation [Wang, 2005].

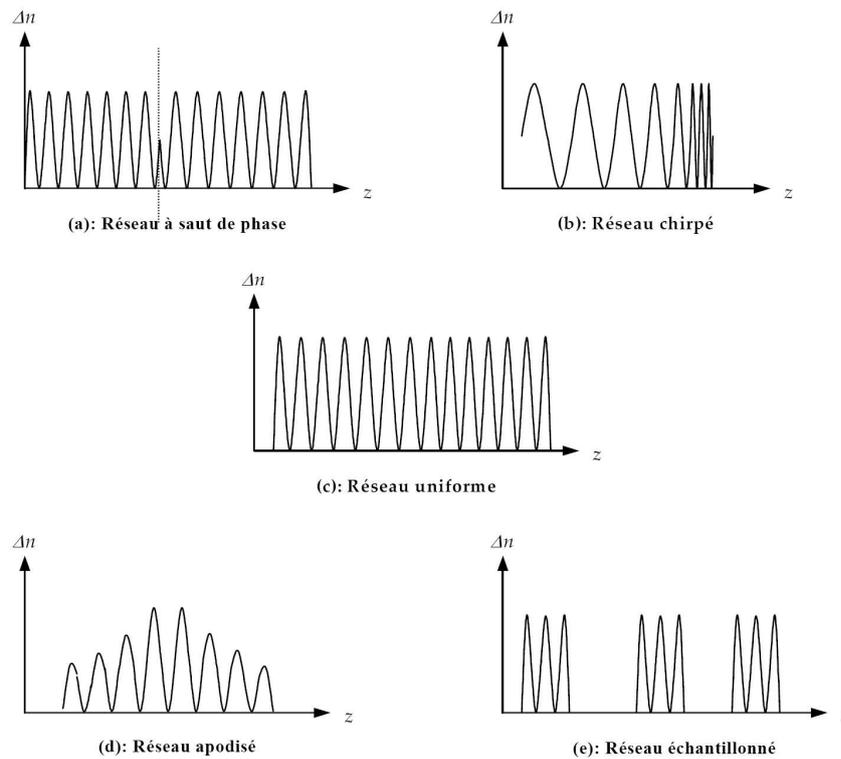


FIGURE 7.4 – Profils d'indice des réseaux de Bragg.

A titre d'exemple, l'approximation de la largeur spectrale d'une onde incidente λ réfléchie par un réseau de Bragg uniforme (à pas constant) à la moitié de l'intensité maximale s'écrit [Turpin, 2001] :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{n_{eff}} \sqrt{(\Delta n_{eff})^2 + \left(\frac{\lambda_b}{L}\right)^2} \quad (7.6)$$

La largeur de spectre est d'autant plus large que la modulation d'indice Δn_{eff} est forte ou que la largeur L du réseau est courte.

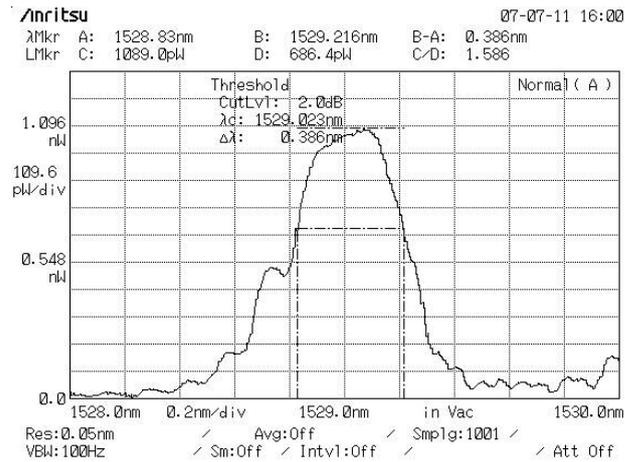


FIGURE 7.5 – Exemple d'un spectre réfléchi d'un réseau de Bragg.

Un réseau de Bragg est dit « faible » lorsque sa modulation d'indice est de l'ordre de 10^{-5} ; La majeure partie de la lumière est alors réfléchi à la moitié du réseau. Pour une modulation d'indice de l'ordre de 10^{-5} , les réseaux sont dit « forts ». La lumière est alors réfléchi à l'entrée du réseau [Obaton *et al.*, 2003]. Δn_{eff} reste néanmoins toujours inférieure à $2 \cdot 10^{-3}$ [Lourdiane, 2005].

7.2.6 Les spécifications d'un réseau

Le choix d'un réseau de Bragg nécessite la spécification de :

- sa largeur spectrale du réseau prise souvent à -3 dB (=Intensité max/2) ;
- sa longueur d'onde centrale de Bragg qui est réfléchi ;
- sa réflectivité.

Les fibres monomodes sont les plus utilisées pour photo-inscrire des réseaux.

7.2.7 La modélisation des réseaux

La modélisation des réseaux de Bragg est étudiée dans [Erdogan, 1997], [Cen *et al.*, 1997] et présentée dans [Rostami *et al.*, 2007], [Skaar, 2008]. Elle détermine la répartition de l'énergie incidente suivant les différents ordres de diffraction. Des logiciels existent qui permettent de simuler des réseaux de Bragg en y incluant des facteurs d'influence externe comme le logiciel OptiGrating de la société Optiwave Corporation.

La manière la plus simple consiste à exprimer la propagation du champ électrique et du champ magnétique composant l'onde monochromatique suivant l'axe d'une fibre monomode. Seul le mode fondamental se propage dans une fibre monomode. L'insertion d'un réseau engendre l'apparition d'ordres de diffraction. Seuls les ordres 0 et 1 sont pris en compte. Les autres sont considérés comme négligeables. Le terme de couplage contra-propagatif est donné du fait de la prise en compte des deux sens possibles de propagation (ordre 0 et 1). L'échange

possible d'énergie entre les deux modes doit respecter le principe de conservation de l'énergie et donne les équations des modes couplés [Palavicini Cham, 2004]. Cette théorie est intitulée la théorie des modes couplés.

Une approche analytique est menée pour des cas simples, par exemple dans le cas des réseaux uniformes. Pour des cas plus complexes, deux solutions sont préférées : une approche numérique incluant un calcul pas à pas à partir des équations et des conditions aux limites ou une approche matricielle dans laquelle le réseau non uniforme est considéré comme une multitude de sous-réseaux de Bragg uniformes (par analogie avec les théories des lignes électriques de transmission, il s'agit d'une approche localisée ou à constantes réparties).

7.2.8 Le réseau de Bragg comme transducteur

En raison du procédé de fabrication, les réseaux de Bragg sont un constituant à part entière de la fibre optique. D'après 7.4, la longueur d'onde de Bragg dépend de l'indice effectif ainsi que du pas du réseau. Une variation d'au moins un de ces paramètres change la longueur d'onde réfléchie. Une modification de l'indice effectif intervient quand la fibre optique subit un changement de température, et/ou une déformation, et/ou un allongement, et/ou une pression. De même, l'influence de ces changements de conditions transforme la dimension de la fibre et par conséquent, le pas du réseau. Cette influence est possible grâce aux propriétés thermo-optiques et photo-élastiques de la silice. La moindre perturbation de l'environnement sur la fibre de type température ou mécanique a donc un impact sur le réseau de Bragg (et le spectre réfléchi associé). La variation de la longueur d'onde centrale de Bragg $\Delta\lambda_b$ en fonction de ces perturbations est mise en équation de la manière suivante [Ferdinand, 1999] :

$$\Delta\lambda_b = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial L} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial L} \right) \Delta L + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial T} + n \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (7.7)$$

avec T la température, ΔT la variation de température, ΔL la variation de longueur (déformation longitudinale). Le premier terme de cette expression désigne la sensibilité intrinsèque du réseau aux déformations et le second exprime sa sensibilité à la température. Le calcul de la sensibilité à la température S_T pour une longueur d'onde de Bragg de 1550 nm sur une fibre usuelle est donné dans [Ferdinand, 1999] et vaut $S_T = 12,1 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Dans ces mêmes conditions, S_ϵ , la sensibilité en déformation longitudinale pour une fibre classique est de $1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Une micro-déformation ou $\mu\epsilon$ représente une déformation relative de $\Delta L/L = 10^{-6}$. La déformation exprime la différence de forme du matériau avant et après l'application d'une contrainte. Cette grandeur adimensionnée provient d'un allongement de la fibre ou d'une pression exercée sur la fibre (corrélation entre l'allongement et la pression). Elle est donc liée à la contrainte qui mesure l'action extérieure sur un matériau (traction, compression) et qui se détermine en effectuant le rapport entre deux termes : la force appliquée et la surface pressée par cette force. Dans le cadre d'une pression isotrope P , le décalage spectral s'explique par un effet mécanique et un effet sur l'indice de la manière suivante :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \left[\left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial P} \right) + \left(\frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial P} \right) \right] \quad (7.8)$$

La sensibilité à la pression hydrostatique S_P dans des conditions de tests équivalents à ceux évoqués précédemment est de $-4,5$ pm/MPa. Les différentes sensibilités des réseaux de Bragg permettent d'observer des perturbations externes. Les réseaux de Bragg servent alors à mesurer des mesurandes. La photo-inscription d'un réseau de Bragg transforme la fibre optique en un Capteur à Fibres Optiques (CFO) intrinsèque (la fibre est directement sensible au mesurande).

7.2.9 L'interrogation d'un réseau de Bragg

Les systèmes d'acquisition nécessitant la discrimination des longueurs d'onde doivent préalablement séparer les longueurs d'onde. Cette séparation peut se faire en amont ou en aval du capteur. En sortie, un composant photosensible réalise la conversion du flux lumineux vers un signal électrique. Cependant, la mesure détermine l'intensité lumineuse de cette longueur d'onde préalablement identifiée.

7.2.9.1 Les techniques de séparation des longueurs d'onde en amont

Le faisceau optique utilisé pour interroger un réseau est constitué d'une source lumineuse réglable en longueur d'onde. C'est une source accordable. Dans la réalité physique, la longueur d'onde à la sortie de cette source est constituée d'un spectre étroit centré sur la longueur d'onde désirée. Le faisceau optique est alors composé de plusieurs longueurs d'onde. La finesse du spectre, la rapidité de changement de sa longueur d'onde, l'étendue du spectre balayé ainsi que la précision de longueur d'onde d'accord influent bien évidemment sur le prix du matériel. Plus les contraintes de ces paramètres sont importantes, plus le coût est élevé.

7.2.9.2 Les techniques de séparation des longueurs d'onde en aval

La source est de type large bande. Pour disperser le spectre optique, cinq principaux systèmes s'utilisent :

- les appareils à prisme ;
- les filtres passifs ;
- les appareils à interférences ;
- les filtres actifs ;
- les réseaux de diffraction.

La littérature présente parfois les filtres latéraux. L'intensité à la sortie de ce filtre est proportionnelle à la longueur d'onde d'entrée. Néanmoins la dynamique de sortie sur un signal d'entrée

variant de quelques nanomètres n'est pas suffisante pour que ce filtre soit intéressant dans un système d'interrogation des réseaux de Bragg. Ces derniers excèdent rarement les quelques nanomètres de variation.

Le détail de ces techniques est présenté en annexe B.

7.2.9.3 Bilan des techniques d'interrogation d'un réseau de Bragg

Le tableau ci-dessous contient un comparatif des différentes techniques d'interrogation d'un réseau de Bragg :

	Interféromètre de Mach-Zehnder	Interféromètre de Michelson	Source accordable	Filtre actif (Fabry-Pérot)	Filtre passif adapté	Appareil à prisme
Multiplexage	+++	+++	+	++	---	++
Rapidité des mesures	-	-	++	++	++	+
Précision des mesures	++	++	+++	+	+++	-
Prix	--	--	---	--	++	-

Tableau 7.1 – Comparatif des techniques d'interrogation d'un réseau de Bragg.

Dans le cas de l'interrogation des réseaux de Bragg grâce à un laser large bande, l'effet de cavité engendre l'apparition de signaux perturbateurs. De nouvelles longueurs d'onde de faible intensité apparaissent [Lourdiane, 2005]. Pour d'autres, cet effet de cavité est utilisé pour former des capteurs à base de deux réseaux de Bragg servant d'interféromètre Fabry-Perot (jauge Fabry-Perot) [Chi Shing, 2005], [Lee *et al.*, 2001]. Les sources optiques n'ont pas besoin de beaucoup de puissance. Tout dépend principalement de la sensibilité du système de détection des longueurs d'onde et de l'affaiblissement du signal entre le trajet émetteur-réseaux de Bragg et le trajet réseaux de Bragg-récepteur. Une source ayant une puissance de quelques mWatt suffit si l'appareil de mesure est un analyseur de spectre optique.

La réflectométrie permet la caractérisation d'un réseau de Bragg [Huang et Yang, 1999], [Obaton *et al.*, 2003]. Cependant, cette technique fait encore partie des techniques à l'état de recherche expérimentale.

7.3 Les capteurs à réseaux de Bragg

Une fibre optique n'est pas limitée à la photo-inscription d'un seul réseau de Bragg. Théoriquement deux réseaux de Bragg peuvent être spatialement côte à côte. Cependant, la majorité des fabricants prévoit un réseau tous les 10 cm environ, sachant qu'un réseau mesure en

moyenne 1 cm. Sur une fibre, plusieurs réseaux, identiques ou non, peuvent donc être photo-inscrits. En positionnant n réseaux à des endroits différents, un multiplexage des capteurs est alors créé, insérant n mesures ponctuelles le long de la fibre. Les réseaux de Bragg forment des réseaux distribués et sont souvent utilisées dans des topologies linéaires (cf. figure 7.1, page 57).

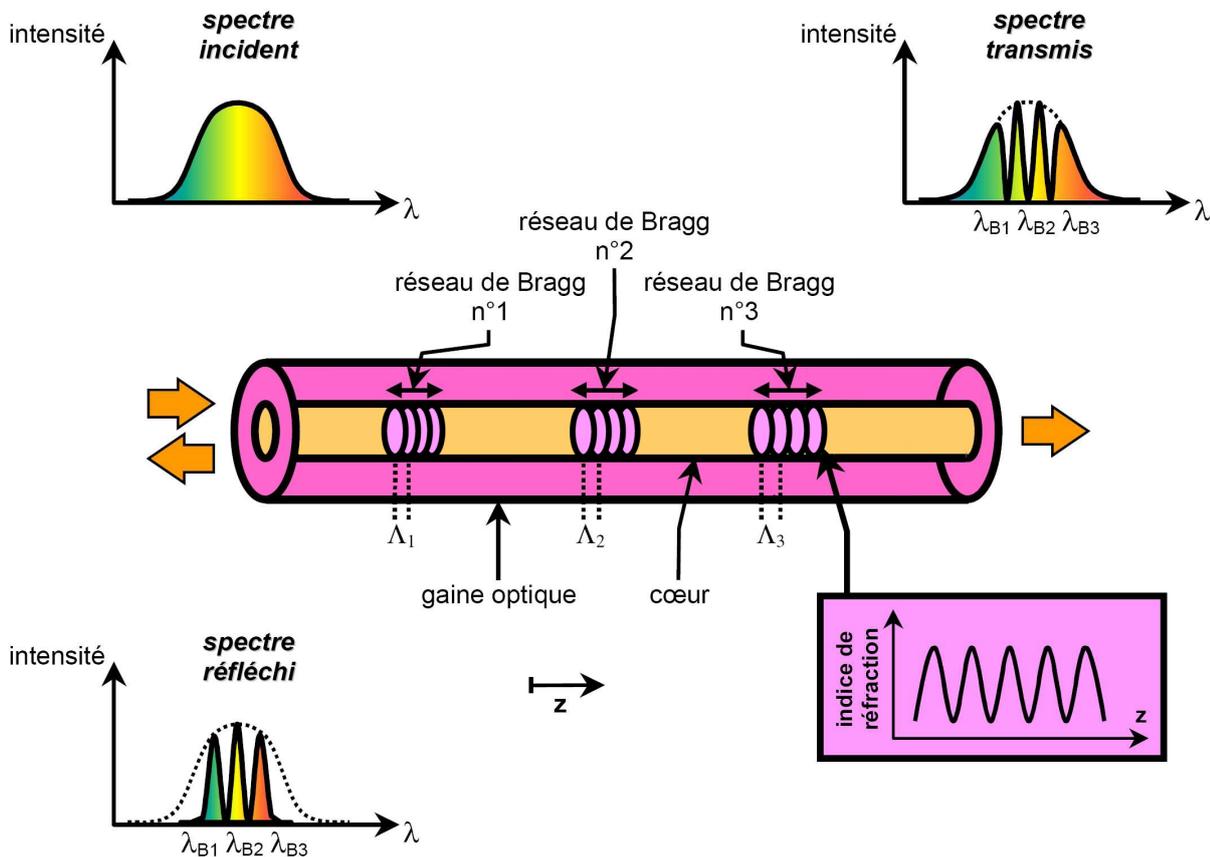


FIGURE 7.6 – Principe de fonctionnement de trois réseaux de Bragg.

Les techniques d'interrogation des réseaux de Bragg se complexifient. Les principes de base restent les mêmes que ce qui a été expliqué en 7.2.9. Parmi ces techniques, cinq catégories sont mises en valeur :

- la réflectométrie/le multiplexage temporel (*Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)*, *Time domain Multiplexing (TDM)* et *Polarization Optical Time Domain Reflectometry (POTDR)*);
- l'échométrie fréquentielle (*Frequency Multiplexing Continuous Wave (FMCW)* et *Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)*);
- l'interférométrie (WDM);
- la commutation du signal;
- le multiplexage de cohérence (*Path Matched Differential Interferometry (PMDI)*).

Bien évidemment, des combinaisons de ces techniques existent [Childs, 2000].

Le multiplexage temporel injecte un signal lumineux de faible durée. Près de la source d'émission, le signal réfléchi est reçu. Le temps d'aller et de retour identifie la position du réseau. Cette technique est très pratique quand les réseaux sont espacés de plusieurs kilomètres, voire de plusieurs dizaines de mètres pour des systèmes optoélectroniques rapides. Les réseaux peuvent être identiques et renvoient la même longueur d'onde.

L'échométrie fréquentielle utilise la modulation du signal lumineux provenant d'une source large bande par une porteuse haute fréquence variable linéairement. Une partie du signal est gardée localement comme référence et l'autre partie se propage jusqu'aux réseaux. Le signal reflété par un réseau de Bragg passe dans un filtre actif variable puis est mesuré par une photodiode. Le signal reçu est ajouté au signal source. L'ensemble est récupéré sur une photodiode puis filtré pour obtenir la différence de fréquence entre le signal source et le signal reçu. Cette différence est appelée fréquence de battement. Par le mélange des signaux, l'amplitude de sortie est proportionnelle à l'amplitude des signaux d'entrée. La variation de la longueur d'onde est donnée en utilisant une modulation de fréquence linéaire ou triangulaire. La mesure du temps de retour en rapport avec la fréquence de battement indique le numéro du capteur [Chan *et al.*, 2000], [Nordin, 2004].

Le multiplexage en longueur d'onde insère plusieurs longueurs dans la fibre. La sélection de la longueur d'onde est réalisée par les réseaux de Bragg qui n'ont pas le même pas.

La commutation du signal utilise un multiplexage spatial. Les capteurs sont implantés sur plusieurs fibres. Un commutateur sélectionne la fibre sur laquelle l'information est mesurée.

Le multiplexage de cohérence interroge des capteurs interférométriques dont les différences de marche sont distinctes les unes des autres. Les capteurs reçoivent la lumière d'une source incohérente à large spectre et retourne le signal modulé en fréquence dépendant de la différence de marche. Le récepteur optique est donc lui aussi un interféromètre [Lequime, 1997].

Les réseaux de Bragg étant sensibles à différents paramètres, des techniques ont été développées pour séparer les différentes grandeurs afin de créer un système d'équations en considérant les grandeurs comme des variables d'état [Frazao *et al.*, 2003] et d'utiliser les bons outils comme l'interféromètre de Mach-Zehnder afin d'obtenir l'intensité et la variation de longueur d'onde en une mesure [Madhan *et al.*, 2005].

Par ailleurs, le conditionnement du réseau de Bragg peut le rendre plus sensible à un paramètre. Par exemple, l'utilisation d'un réseau de Bragg sur une plaque d'aluminium le rend 8 fois plus sensible à la température [Xue *et al.*, 2006].

Depuis une quinzaine d'années, de nombreux secteurs se sont ouverts aux réseaux de Bragg, par exemple, les déformations de bâtiments (évaluation des performances d'extensomètres à fibres optiques à réseaux de Bragg pour le Génie Civil)[Dewynter-Marty *et al.*, 2001], [Dupont, 2002], de ponts [Udd *et al.*, 2000], d'éoliennes, de bateaux, d'avions, des matériaux composites ([Molimard, 2005]) et de manière générale, la surveillance des matériaux par un processus non destructif. Le laboratoire Mesures Optiques du CEA-List a par ailleurs breveté

plusieurs principes à ce sujet. La mesure du champ magnéto-élastique s'effectue avec un réseau de Bragg couplé à un matériau magnéto-élastique [Cruz *et al.*, 1997], [Davino *et al.*, 2006].

7.4 Un capteur à réseaux de Bragg innovant

7.4.1 Objectifs

Dans notre application, nous avons besoin de localiser un véhicule se déplaçant sur une route. Des prototypes de capteurs à fibre optique, utilisés comme capteurs de pesée, ont déjà été testés expérimentalement (cf. paragraphe 4.3.1.2 page 28). Noyés dans l'enrobé, ils répondent à notre besoin d'installer un dispositif discret et jouissent des avantages de l'utilisation des fibres optiques (paragraphe A.5 page 180) et de celles des capteurs fibrés (paragraphe 7.1.3 page 58).

La fibre est conditionnée dans un barreau de résine avant d'être installée à 1 cm environ de la surface de la chaussée comme le montre le manuel d'installation de ce type de capteur [Line, 2009]. L'ensemble est ensuite de nouveau recouvert de résine pour arriver à la surface de la chaussée. L'enfouissement de la fibre dans la résine limite son étirement. La résine a un double rôle : elle sert à la fois à limiter la pression exercée par le véhicule sur la fibre et à limiter son étirement. Ainsi la fibre se trouve étirer plus particulièrement vers l'endroit sur lequel passe le véhicule. Cependant, ce capteur ne peut situer un véhicule. Le paragraphe 7.2.8 page 65 a présenté le réseau de Bragg comme un capteur sensible à une contrainte. La déformation de la fibre est variable suivant l'endroit sur lequel passe le véhicule. Elle est plus prononcée sous et autour des points d'appui. L'adjonction d'un réseau de Bragg sur la fibre dans cette zone entraîne l'appariation d'un étirement de la fibre optique. Cet étirement change le pas du réseau de Bragg et par conséquent la longueur d'onde centrale de ce réseau de Bragg. Une augmentation de la longueur d'onde de Bragg traduit un étirement du réseau et donc de la fibre. L'insertion de plusieurs réseaux de Bragg sur la fibre doit permettre de reconstituer la zone dans laquelle s'exerce la pression due au véhicule. Les objectifs sont alors d'insérer le nombre de réseaux de Bragg nécessaire pour mesurer la position d'un véhicule sur cette fibre à la précision voulue et d'être capable de discriminer.

7.4.2 Principe

Le but de ce système est de mesurer un étirement local d'une fibre optique installée dans la chaussée de la route à l'aide d'une fibre optique à réseaux de Bragg. Cet étirement provient de la pression exercée par les pneus d'un véhicule sur celle-ci et provoque une variation de la longueur d'onde de Bragg. La détection des endroits pressés par la charge du véhicule permet de déterminer la position des pneus et donc du véhicule le long de cette fibre. En associant plusieurs réseaux de Bragg spatialement séparés avec une longueur d'onde de Bragg différente, il est possible de mesurer les contraintes exercées sur certains réseaux et donc de remonter

jusqu'au réseau considéré puis jusqu'à la position sur la fibre par simple comparaison entre la longueur d'onde réfléchie et celle étalon [Giaccari, 2003]. Ce système utilise un multiplexage à la fois spatial et de longueurs d'onde. A l'heure actuelle, les réseaux de Bragg sont utilisés comme capteurs optiques de contraintes, de filtres, etc. Néanmoins, une telle utilisation n'a pour le moment pas encore été expérimentée. Une précision centimétrique étant recherchée, un réseau de Bragg doit être inséré sur la fibre tous les centimètres.

Ce capteur innovant est composé d'une fibre optique standard de communication contenant une zone sensible (zone présentant des réseaux de Bragg) égale à la largeur de la voie de circulation. Par exemple, sur une route du réseau secondaire, la largeur minimale de la voie est de 3 m. La zone sensible de cette fibre, c'est-à-dire la partie de fibre photo-inscrite avec les différents réseaux de Bragg doit avoir une taille au moins identique à cette largeur de voie pour détecter l'ensemble du véhicule. Ce capteur, positionné perpendiculairement à l'axe de circulation des véhicules, contient 300 réseaux de Bragg espacés tous les centimètres dans notre exemple. Une seule extrémité de la fibre doit être reliée à un connecteur dans la mesure où nous optons pour un fonctionnement en réflexion. Avec un dispositif à réseaux de Bragg, il est plus fréquent de travailler en réflexion et de repérer les pics de Bragg plutôt que de regarder les longueurs d'onde de Bragg qui sont manquantes. Cette configuration permet notamment de simplifier l'installation sur site. En effet, l'interrogation de la fibre en transmission utilise les deux extrémités de la fibre : un pour l'émission du signal et l'autre pour récupérer les informations. Dans le cas d'une installation sur une voie de circulation, il faut donc ramener ces extrémités sur le bord de la chaussée afin de les rendre facilement accessibles à un système d'interrogation. Cela suppose, soit de faire traverser la fibre pour avoir chaque extrémité de chaque côté de la route, soit de faire revenir une extrémité de la fibre auprès de l'autre. Ce dernier cas entraîne l'apparition d'une boucle qui doit respecter un certain rayon de courbure pour limiter l'atténuation du signal. En général ce rayon est supérieur à 5 cm. Nos réseaux de Bragg représentent des éléments ponctuels sur la fibre optique comme le montre la figure 7.7.

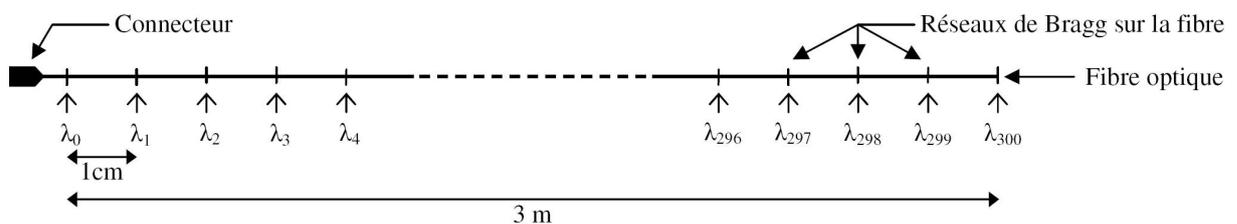


FIGURE 7.7 – Système idéal à réseaux de Bragg pour une largeur de voie de 3 m.

Un tel système conserve les propriétés avantageuses de la fibre optique et des capteurs à fibres optiques.

7.4.3 La précision sur la mesure

Les déformations engendrées sur les réseaux ont été évaluées grâce à des fabricants de réseaux de Bragg. Elles sont de l'ordre de 100 $\mu\epsilon$ à 1 000 $\mu\epsilon$ pour les poids lourds. Ainsi, le système d'interrogation doit différencier les longueurs d'onde avec un pas d'au maximum 0,05 nm.

7.4.4 Le capteur testé

Lorsqu'une contrainte mécanique transverse est exercée sur la fibre à l'endroit d'un réseau de Bragg, la longueur d'onde du filtre augmente proportionnellement à cette contrainte. Le réseau se comporte comme un capteur ponctuel qui, placé dans la chaussée, peut répondre à la pression d'une roue de véhicule passant dessus. En positionnant plusieurs réseaux à des endroits différents, il est possible d'accéder à la lecture d'un champ de contrainte mécanique de la chaussée.

Dans cette étude, la déformation très rapide de la fibre au passage d'un véhicule s'effectue de manière ponctuelle. Les réseaux de Bragg mesurent également les variations de température. La longueur d'onde d'un réseau de Bragg varie d'environ 10 pm par degré Celsius (pour une longueur d'onde de 1 300 nm). Cette variation est de 12,1 μm pour une longueur d'onde de 1 550 nm à température ambiante.

Une technique doit être mise en oeuvre pour discriminer ce paramètre gênant dans ce cas. La température du capteur varie avec l'évolution de la température de la chaussée. Cette variation est lente. En calibrant fréquemment la mesure de référence, il est possible de ne plus tenir compte de l'évolution de la température. Ainsi la dérive en température ne s'exprime plus dans la mesure de la longueur d'onde centrale de Bragg. Celle-ci s'écrit alors :

$$\Delta\lambda_b = \lambda_b(1 - p)\frac{\Delta L}{L} \quad (7.9)$$

avec p , le coefficient photo-élastique efficace déduit des coefficients p_{11} et p_{12} du tenseur photo-élastique caractéristique de la fibre optique : $p = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})]$ et ν , le coefficient de Poisson de la fibre.

La fabrication du capteur, introduite précédemment, est impossible pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la technologie actuelle ne permet pas de créer des fibres à réseaux de Bragg tous les centimètres. La photo-inscription d'un réseau de Bragg induit la monopolisation d'environ 10 cm de fibre. Sur ces 10 cm, le réseau de Bragg en lui-même occupe 1 cm. Un réseau de Bragg n'est donc présent sur la fibre que tous les 10 cm. En considérant une zone sensible de 3 m, trente réseaux sont inscrits. Chaque réseau doit posséder une longueur d'onde de Bragg différente pour identifier la position de la contrainte. Pour arriver à la précision désirée, dix fibres composées de trente réseaux de Bragg et décalées de 1 cm les unes par rapport aux autres sont adjointes. Cette solution présente l'avantage d'utiliser toujours les mêmes fibres avec la

même grille de longueurs d'onde photo-inscrites. Par ailleurs, elle réduit également la largeur de la bande spectrale à interroger (trente longueurs d'onde de Bragg distinctes contre 300 dans le cas du capteur idéal) [Aubin *et al.*, 2006a]. Cette solution viable n'a pas été retenue pour des raisons de coût prohibitif.

Une solution alternative a été commandée auprès de la société iXFiber. Le réseau de Bragg est photo-inscrit dans le coeur d'une fibre photosensible (iXFiber CMF - Cladding Mode Free) de type similaire à une fibre Corning SMF28 (fibre silice de 125 microns), mais étudiée pour réduire les pertes d'insertion (cf. paragraphe A.3 page 179). Spécialement conçue et fabriquée par cette société, cette fibre permet ainsi d'éviter une accumulation des pertes d'insertion dans une configuration de capteurs à réseaux de Bragg distribués. Un revêtement d'acrylate de $250 \mu\text{m}$ recouvre chaque réseau pour les rendre étanches aux ions OH^- . La fibre étant très hydrophile, cette opération évite une fragilité locale. Par ailleurs, la température du capteur dans le cadre de notre application étant inférieure à 80°C , un revêtement polyimide ou métallique n'est pas nécessaire.

Chaque fibre comporte 24 réseaux d'environ 6 mm de long chacun, groupés par trois, de longueur d'onde croissante le long de la fibre. Les réseaux sont espacés de 1,6 nm avec une bande passante de 0,3 nm. La gamme spectrale couverte par les filtres s'étale donc sur un peu moins de 39 nm, choisie principalement dans la bande C (1530 - 1565 nm). Cette bande spectrale a été sélectionnée en raison sa fréquente utilisation dans le milieu des télécommunications. Par ce choix, des composants optoélectroniques existent et l'atténuation du signal est faible dans la fibre. Chaque ensemble de trois réseaux mesure 45 mm de long et chaque ensemble est séparé de 135 mm. Chacune des fibres est décalée de 45 mm de façon à pouvoir détecter n'importe quelle position sur l'axe perpendiculaire à l'axe routier et à ne laisser aucune zone sans réseau de Bragg. Les réseaux de Bragg sont espacés bord à bord de 9 mm. Nous nous sommes limités à 24 réseaux pour des questions de coût. La zone sensible du système optique à réseaux de Bragg mesure 144,0 cm (130,5 cm pour la première fibre et trois décalages successifs de 4,5 cm). La position du centre du dernier réseau est à 143,3 cm. Les fibres livrées gainées sont d'une grande fragilité. Sur chaque fibre, la position physique du premier réseau de Bragg se situe à la longueur d'onde la plus faible. La plus grande est attribuée au dernier réseau.

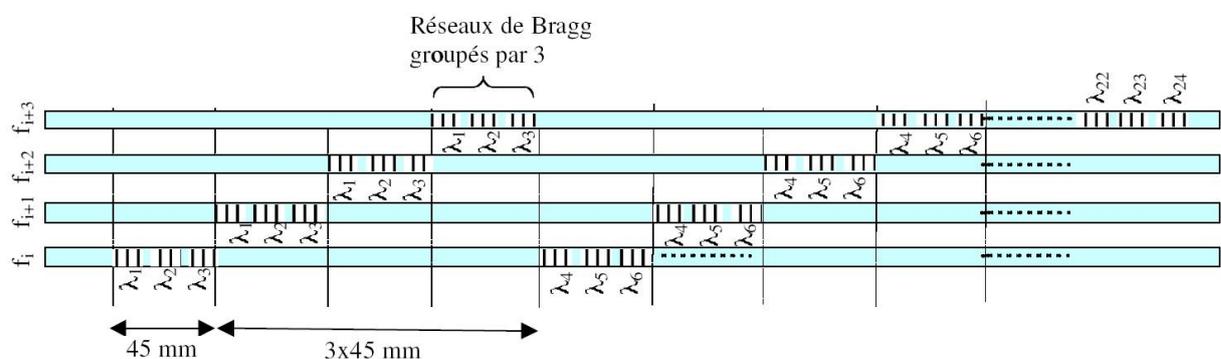


FIGURE 7.8 – Présentation du système réel optiques à réseaux de Bragg.

Le multiplexage spatial des fibres permet de résoudre certains problèmes d'interrogation des réseaux (paragraphe 7.2.9 page 66). En effet, actuellement les systèmes optiques simples ont une bande passante encore trop faible pour mesurer 480 nm, cas où 300 réseaux séparés par 1,6 nm sont mis bout à bout, avec une précision de 0,05 nm. Chaque multiplexage spatial divise d'autant la bande de longueurs d'onde à analyser.

La technologie utilisée pour fabriquer des fibres à réseaux de Bragg relève d'un investissement lourd. Son achat reste encore assez onéreux mais les performances espérées grâce à ce produit pourraient en faire un capteur très prometteur.

Le capteur de position idéal doit être rapide, précis, invisible, sûr, robuste, insensible aux conditions météorologiques. Celui-ci offre les qualités requises.

Pour le moment, le système à base de réseaux de Bragg n'est pas encore utilisé pour ce type d'application. Il s'agit donc d'observer son comportement dans une telle situation.

7.4.5 Le choix de l'interrogation des réseaux

Sur un capteur de 3 m, il est possible de disposer trente réseaux espacés de 10 cm. Pour arriver à la précision désirée, 10 fibres de 30 réseaux de Bragg sont décalées de 1 cm les unes par rapport aux autres. Cette solution présente l'avantage d'utiliser toujours les mêmes fibres avec la même grille de longueurs d'onde photo-inscrites. Par ailleurs, elle réduit également la largeur de la bande spectrale à interroger ce qui est plutôt un avantage (plus large choix des sources optiques).

Pour interroger les réseaux, la source peut être constituée d'une source à large bande qui recouvre toute la bande spectrale des réseaux de Bragg. Par ce principe, le système de réception est assez complexe puisqu'il doit être capable de séparer les différentes longueurs d'onde. L'autre possibilité comprend une source monochromatique accordable. Elle balaye la bande spectrale, longueur d'onde par longueur d'onde. Ainsi, à chaque acquisition dont la fréquence est définie dans le paragraphe 6.2 page 56, toutes les longueurs d'onde sont scrutées.

D'après le paragraphe 7.2.9 page 66, la précision demandée (au moins 0,05 nm), la vitesse d'acquisition (au moins 1 kHz), le positionnement au bord d'une route, la répétabilité conduisent à déconseiller les systèmes à base d'interféromètres. De même, dans ce cas d'étude, les systèmes constitués d'un prisme demandent un positionnement des éléments précis. Les systèmes utilisant des moteurs tournants, quant à eux, ne permettent pas d'acquérir suffisamment rapidement l'ensemble du spectre. Un interrogateur à base d'une source accordable semble être la solution la plus adéquate. Le laboratoire a fait l'acquisition d'un interrogateur à réseaux de Bragg, le W5-7, fabriqué par Smart Fibres Ltd (figure 7.9). En plus de sa source accordable, il intègre le système d'acquisition. Cette solution est la plus adaptée dans notre projet.



FIGURE 7.9 – Interrogateur à réseaux de Bragg de chez Smart Fibres Ldt utilisé pour les manipulations.

Cet interrogateur est compact et n'exige pas une installation sur un table anti-vibration. Il permet d'effectuer 500 mesures tous les kilos-hertz sur quatre voies simultanément. A sa fréquence maximale d'utilisation (un kilo-hertz), sa précision est de 1 pm. Une précision plus faible et donc de meilleure qualité est obtenue en utilisant une moyenne (jusqu'à 0,2 pm, soit 0,25 μ strain). La fréquence d'échantillonnage de l'utilisateur est alors plus faible.

Sa fidélité est de 5 pm. Il s'emploie dans un lieu dont la température est comprise entre 0 et 50 °C et un degré hygrométrique inférieur à 80 %. Dans la pratique, ces valeurs sont effectivement observées. L'interrogateur balaye une gamme de longueurs d'onde comprise entre 1 510 nm et 1 590 nm.

Cet appareil repère les longueurs d'onde de Bragg en utilisant un laser à balayage. La puissance de ce laser de classe 1 ne dépasse pas 0,25 mW. Le diamètre de son faisceau mesure 9 mm et son ouverture numérique est de 0,1. Les données sont récupérées grâce à une liaison Ethernet. Le boîtier est compact 132 x 267 x 135 mm.

7.4.6 La construction du capteur

La base de ce capteur est réalisée suivant les spécifications évoquées précédemment (paragraphe 7.4.4 page 72). La société livre des réseaux de Bragg photo-inscrits sur une fibre optique comme cela a été évoqué précédemment. Le raccord de type FC/APC a été choisi. Il limite les réflexions dues à l'interface fibre-air qui sont capturées par le coeur de la fibre¹. L'extrémité de la fibre est polie avec un angle de 8° sur quelques millimètres. La fabrication du capteur évoquée dans la partie précédente suppose l'utilisation de quatre fibres ayant leur zone sensible de même dimension. La zone sensible est définie comme celle contenant des réseaux de Bragg. En raison du décalage physique des réseaux, une compensation de la longueur du pigtail² doit préférentiellement être faite. Grâce à cette compensation, la connexion avec l'interrogateur est plus aisée et évite des tensions physiques différentes sur chaque fibre.

Le décalage spatial et le positionnement des fibres les unes à côté des autres ont été réalisés manuellement afin d'obtenir un ensemble présenté par la figure 7.8 page 73. Une erreur inférieure à 5 mm est donc introduite lors du positionnement manuel du capteur.

1. Cf. annexe A.

2. Le pigtail est la longueur de fibre optique entre la zone sensible et le connecteur.

Pour des facilités de pose des fibres, la résine³ est d’abord coulée dans le fond d’une goulotte PVC en U, de dimension interne 16 cm de largeur par 10 cm de hauteur pour une longueur de 2 m. Le U est rempli à demi. Une fois la résine sèche, le profilé en U est découpé dans le sens de la largeur. La longueur ainsi obtenue doit correspondre à la dimension de l’ensemble des zones sensibles des fibres. Chaque zone sensible est positionnée une à une et décalée spatialement. Le profilé est ensuite rempli complètement de résine. Les pigtaills peuvent être protégés en les disposant dans un tube en caoutchouc. La manipulation de l’ensemble est ainsi moins risquée.

7.4.7 Les valeurs théoriques attendues

Les fibres optiques sont décalées spatialement les unes des autres pour former ce capteur. Cependant, chacune d’elles possède les mêmes réseaux photo-inscrits. La figure 7.10 présente les grilles des longueurs d’onde des fibres n°1 et n°2 qui constituent ce capteur. Les réseaux sont simplement décalés de 4,5 cm.

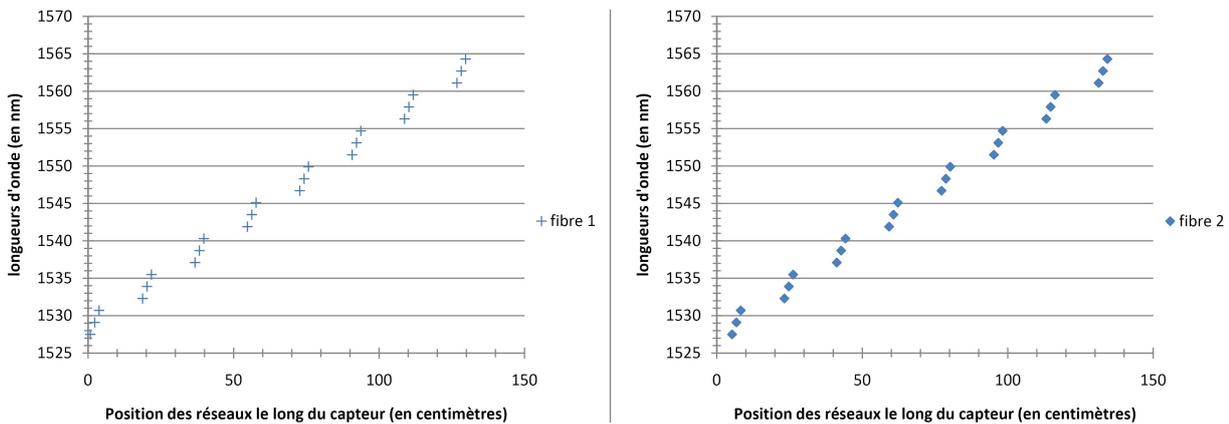


FIGURE 7.10 – Présentation des longueurs d’onde en fonction de la position sur la fibre n°1 (à gauche) et la fibre n°2 (à droite).

Le relevé théorique des longueurs d’onde des quatre fibres en fonction de la position sur le capteur est alors construit comme l’indique la figure 7.11. Le capteur présente bien un élément sensible à la pression tous les 1,5 cm.

3. Résine de couleur noire de référence : Resimast 460 boucle de la société Résipoly, considérée comme une résine souple.

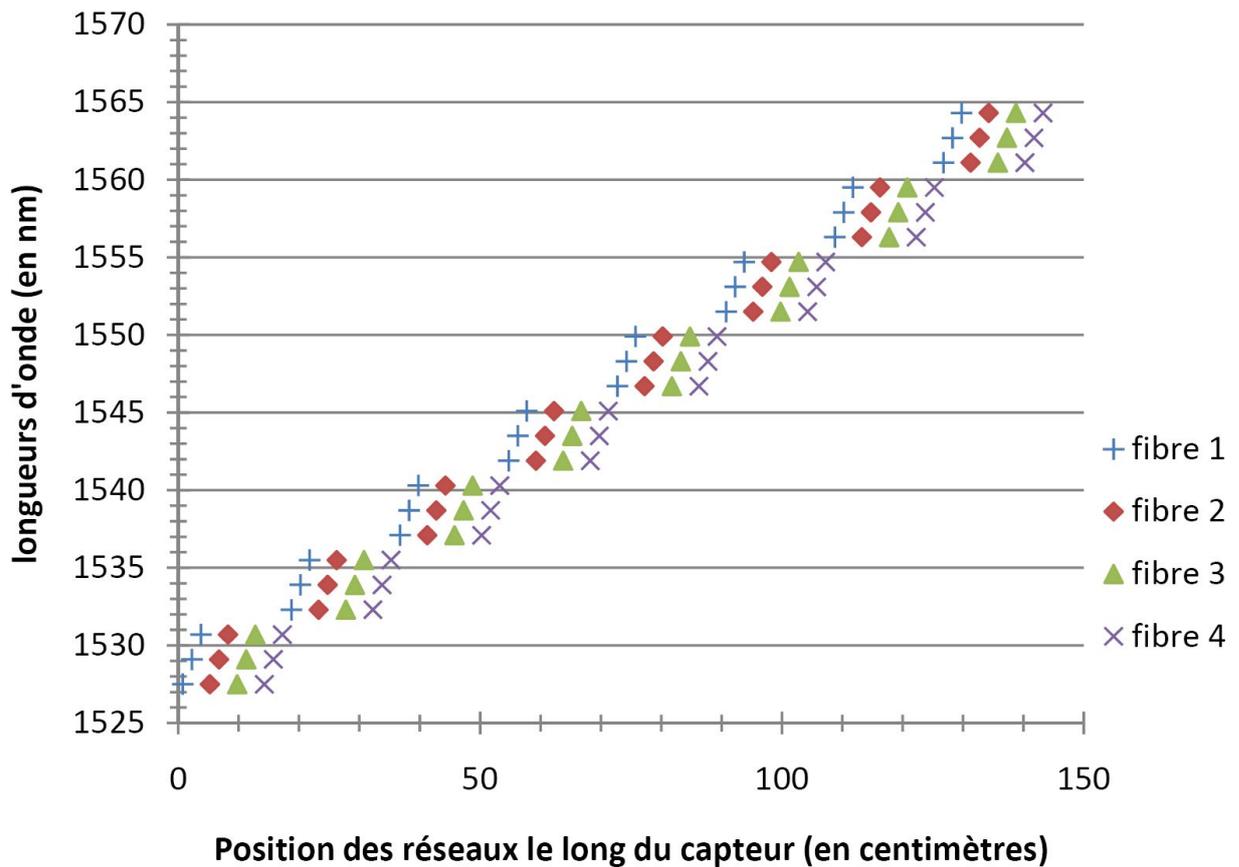


FIGURE 7.11 – Présentation des longueurs d'onde en fonction de la position des quatre fibres constituant le capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg.

Lorsqu'une pression, considérée comme ponctuelle, est exercée sur le capteur par l'intermédiaire d'un pneu de véhicule, les fibres optiques et leurs réseaux sont étirés près de la zone de contrainte. Ceci entraîne une augmentation de la longueur d'onde de Bragg évaluée au maximum à $1000 \times 1,2 \text{ pm}$, soit $1,2 \text{ nm}$ (paragraphe 7.4.3 page 72). L'écart entre les réseaux a été choisi pour que les variations d'un réseau ne camoufle pas la longueur d'onde d'un autre réseau (figure 7.12). Ainsi, pour une longueur d'onde mesurée d'une fibre, il est possible de connaître sa position physique sur le capteur.

Plus un réseau est éloigné de la source de la contrainte et moins la variation est importante. La fibre est ancrée dans la résine. Cette construction limite l'élongation de toute la fibre suite à la sollicitation extérieure. L'estimation de l'influence de la contrainte sur la variation des réseaux le long de tout le capteur ne fait pas l'objet de cette étude. Ainsi nous ne pouvons prévoir l'étendue de l'influence de la pression exercée par un véhicule sur le capteur.

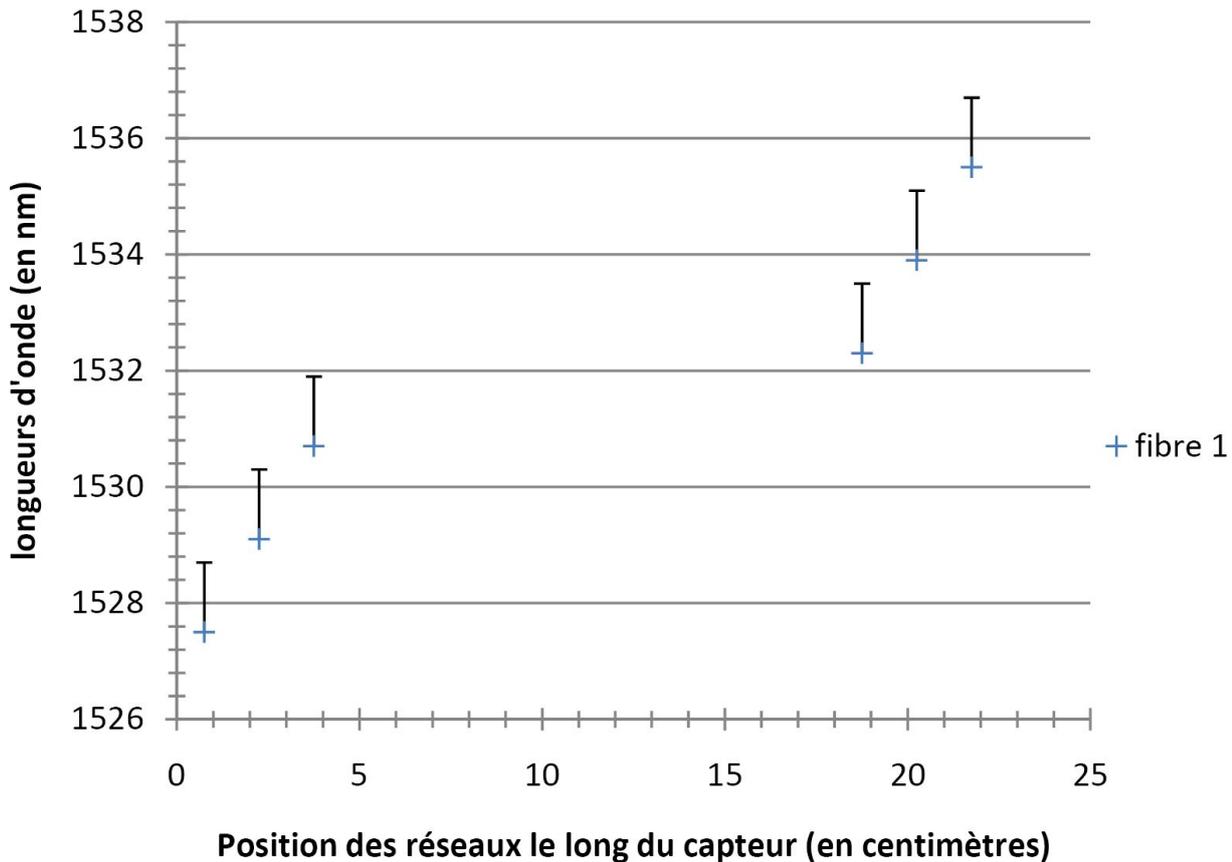


FIGURE 7.12 – Représentation des variations maximales de différentes longueurs d’onde présentes sur le début de la fibre n°1.

La photo-inscription des réseaux étant réalisée industriellement, l’erreur de positionnement des réseaux avoisine le millimètre. Le décalage spatial des fibres étant réalisé manuellement, il s’ajoute une autre erreur de positionnement estimée à 0,5 millimètre. L’ensemble des réseaux est donc situé à 0,6 mm près.

Pour les expériences réalisées, il est intéressant de comparer la position des pneus et leurs largeurs par rapport à des données déterminées par au moins un autre capteur. Lorsque le capteur est sollicité par un véhicule en mouvement, les variations des longueurs d’onde fluctuent dans le temps sous forme de pic. Ces variations sont calculées en soustrayant chaque longueur d’onde de Bragg du capteur sans sollicitation externe - dite longueur d’onde de référence - à la même longueur d’onde lors d’une sollicitation. Au fil du temps, ces variations évoluent. Deux temps sont mesurés. Le premier représente le temps d’excitation d’un objet se déplaçant sur le capteur. Il est mesuré à la base du pic de variation. Le deuxième est pris au moment où le signal dépasse une amplitude de 10 % de son excursion totale puis repasse sous cette même amplitude. Ces temps sont expliqués schématiquement sur la figure 7.13.

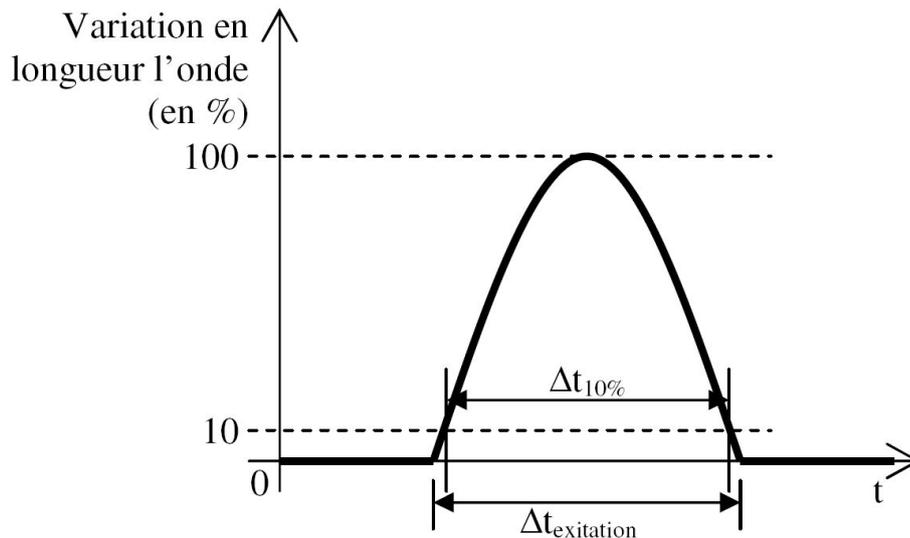


FIGURE 7.13 – Représentation des temps mesurés suite à l'excitation d'un objet en mouvement sur le capteur.

Les variations sont nulles si l'environnement n'est pas perturbé. Sensibles aux contraintes, les longueurs d'onde des réseaux de Bragg fluctuent également en fonction de la température. Une évolution de la température de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ entraîne, pour un réseau de Bragg présent dans ce milieu, une variation de sa longueur d'onde de Bragg de $0,95\text{ nm}$, sachant que celle-ci est centrée sur $1\,550\text{ nm}$ à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cependant, l'évolution de la température pour l'ensemble des réseaux inscrits sur ce capteur est pratiquement identique (la totalité de la grille est centrée sur $1\,545,9\text{ nm}$ à $\pm 18,4\text{ nm}$ suivant la grille mesurée après la fabrication des réseaux). Dans l'application routière proposée, la variation de la température change très lentement par rapport à l'excitation provoquée par une contrainte exercée lors du passage d'un véhicule. Ainsi, la distinction de ces deux phénomènes peut être constatée simplement en effectuant régulièrement, toutes les heures par exemple, une mesure des longueurs d'onde sans la présence d'un véhicule. Ces références servent de repère pour détecter les changements rapides des longueurs d'onde.

7.4.8 L'influence du processus d'adjonction de la résine sur les réseaux de Bragg

La gaine protectrice de la fibre, ainsi que le matériau, jouent un rôle dans la manière dont le réseau est perturbé par son environnement [Hao *et al.*, 2006]. Dans ces expérimentations, la fibre gainée se retrouve, par cette technique de pose, noyée dans de la résine. Cette protection est obtenue par l'adjonction puis le mélange de la résine avec un catalyseur. Ils sont liquides tous les deux et réagissent afin d'obtenir une matière solide. Cette solidification passe par une réaction chimique exothermique ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Lors de la réception des fibres, une mesure des longueurs d'onde a été réalisée afin de vérifier si le matériel était conforme aux spécifications. Cette opération validée, les fibres ont ensuite été conditionnées afin d'obtenir le capteur présenté précédemment. Après leur fabrication, un

nouveau relevé a été effectué. La figure 7.14 présente les différentes variations des longueurs d'onde de Bragg sur deux fibres optiques présentant chacune 24 réseaux de Bragg avant et après le conditionnement, conformément aux spécifications précédentes. Cette figure représente la différence des longueurs d'onde entre une mesure une fois la fibre noyée dans la résine (réaction de la résine terminée et capteur au repos sans sollicitation extérieure) et le même réseau avec la fibre non conditionnée. D'une manière générale, la longueur d'onde du réseau après immersion dans la résine est plus élevée que lorsque le réseau est non conditionné. Ces variations fluctuent entre 1,2 nm et 3,5 nm de manière aléatoire. Cela laisse supposer que le pas des réseaux a augmenté en partie à cause de la température. Puis, en durcissant, les réseaux ont gardé leur forme. Les longueurs d'onde de Bragg sont ainsi plus élevées. Une augmentation de température de 40 °C entraîne une augmentation de la longueur d'onde de Bragg de 0,4 nm environ. Ainsi, la fibre subit, en plus de la contrainte thermique, une contrainte mécanique.

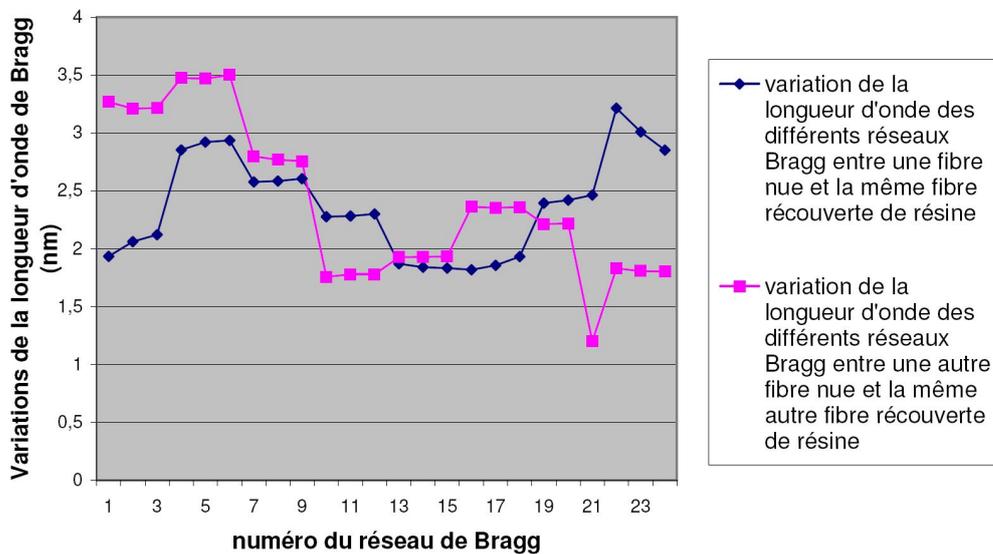


FIGURE 7.14 – Variations des longueurs d'onde de 24 réseaux de Bragg présents sur deux fibres différentes ($\lambda_{b-AVEC-resine} - \lambda_{b-SANS-resine}$).

La figure 7.15 représente les écarts des longueurs d'onde entre deux réseaux successifs d'une même fibre. Ces fibres sont les mêmes que celles décrites précédemment. Après la fabrication des réseaux, l'écart varie de 1,3 à 1,7 nm dans les deux cas schématisés par deux cercles réguliers sur la partie gauche de la figure 7.15. La grille d'espacement des réseaux imposait un écart moyen entre deux réseaux de 1,6 nm. Ces écarts ont un écart type inférieur à 0,1 nm. L'ensemble reste borné entre 1,3 nm et 1,7 nm. Après son conditionnement dans la résine (partie droite de la figure 7.15), cet écart varie de manière aléatoire entre 0,5 nm et 3,5 nm. La fibre repérée par un symbole en triangle possède une grille de longueurs l'onde dont l'écart moyen, entre eux, est de 1,4 nm et dont l'écart type est de 0,4 nm. L'autre fibre, dont les résultats sont présentés en forme d'étoile sur un fond coloré lui-même de forme carrée, a un écart moyen entre deux réseaux consécutifs de 1,7 nm et un écart type de 0,5 nm.

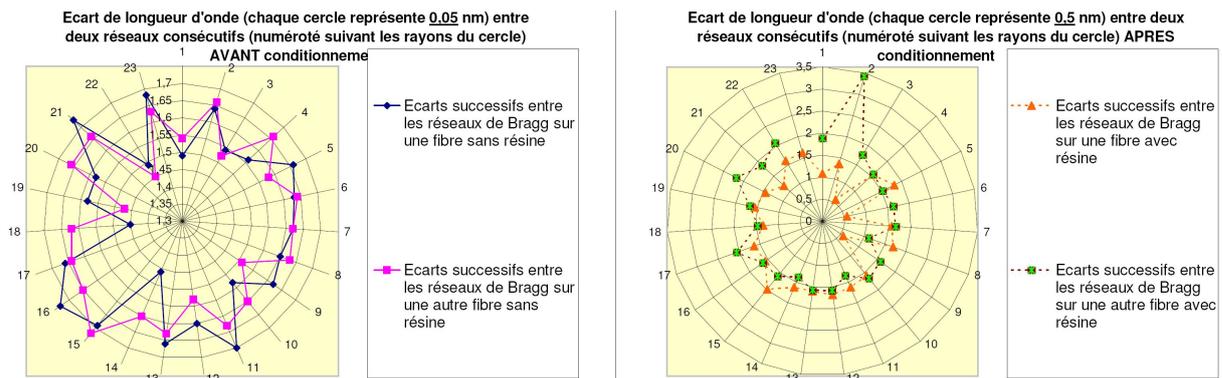


FIGURE 7.15 – Ecart successifs entre les longueurs d’onde de Bragg des réseaux présents sur deux fibres avant (à gauche) et après (à droite) le conditionnement du capteur dans de la résine.

Après le conditionnement du capteur dans la résine, les écarts révèlent de fortes disparités. D’une manière générale, la résine étire les réseaux de Bragg puisque les longueurs sont plus importantes après l’insertion de la fibre dans la résine. Cette variation est difficilement prévisible. La résine peut avoir une réaction variée en fonction d’un taux d’humidité de l’environnement élevé, d’un mauvais mélange ou encore d’une mauvaise ventilation lors du séchage ce qui peut engendrer un emballement thermique.

Ces résultats sont quand même à pondérer en fonction de plusieurs facteurs :

- les mesures des longueurs d’onde des réseaux sans conditionnement mécanique autre que sa gaine ont été prises avec un dispositif constitué d’une source à large bande et d’un analyseur de spectre. Quant aux longueurs d’onde des réseaux noyés dans la résine, ils ont été relevées avec l’interrogateur W5 ;
- la température n’a pas été prise lors des différentes mesures avant et après le conditionnement du capteur.

Cependant ces variations ne peuvent être uniquement dues à ces deux facteurs. L’importance de l’écart type entre deux réseaux ne peut être due ni aux appareils de mesure ni à la différence de température qui est constante dans chaque cas. La résine n’a pas toujours une constitution homogène en se solidifiant ce qui entraîne des écarts de longueurs d’onde significatifs d’un réseau à l’autre. Entre les deux cas de figure, avant et après le conditionnement dans de la résine, la température au niveau du réseau n’excédait pas une différence de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_{avant} - T_{apres}$), c’est-à-dire un décalage des réseaux, au maximum, de $-0,1\text{ nm}$. Pour compenser cet écart, il faut ajouter $+0,1\text{ nm}$ à l’ensemble des réseaux après leur installation dans de la résine. Même en ajoutant cette compensation, les écarts restent variables. Ces résultats montrent bien que la résine influe effectivement sur les réseaux de Bragg.

Sur un des capteurs construits, plusieurs réseaux ne sont pas visibles par l’interrogateur à réseaux de Bragg : six réseaux sur 96 (dont trois placés comme réseaux de tête de trois fibres optiques et deux positionnés chacun en fin de la zone sensible de la fibre optique). Ces réseaux étaient opérationnels avant leur introduction dans de la résine.

Des variations de longueurs d'onde de la fibre moins importantes sont obtenues à condition de la positionner quand la résine commence à durcir. La variation de température et les contraintes s'exerceront moins sur celle-ci et ses réseaux.

7.5 Bilan du capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg

La fibre optique seule permet de classer les véhicules en différentes catégories avec une précision de l'ordre de 99% [David *et al.*, 1999]. La mesure de poids permet de détecter les véhicules dépassant le poids maximum admissible à l'essieu [Kunzler *et al.*, 2003]. En France, il est de 13 tonnes. Un véhicule en surcharge use plus la chaussée de la route et sa réfection survient plus rapidement que prévue. Cela engendre un surcoût pour le gestionnaire de la route. En théorie ce CFO possède de nombreux points forts (mesures de la position et de la largeur des pneus, du poids...). Cependant, pour un seul capteur, les prix varient de 12 000 € à 100 000 €. Par ailleurs, le système d'interrogation coûte dans les 45 000 €. Pour ces raisons économiques, deux capteurs nommés CFO n°1 et CFO n°2 ont été fabriqués à l'identique. Le coût du capteur et de son système d'interrogation est inadéquat à l'heure actuelle avec les contraintes des gestionnaires.

Dans ce capteur, la partie interféromètre coûte la plus chère. Pour résoudre ce problème, il faut simplifier le système. Une technique annexe consiste à photo-inscrire un seul réseau par fibre optique et à n'utiliser qu'une simple diode laser de type DFB, réglée sur le réseau de Bragg. Cependant, en reprenant l'exemple du capteur optique développé, cette technique impose la manipulation et le décalage spatial de 96 fibres... Le multiplexage en longueur comme le présente la solution développée, possède l'avantage d'avoir peu de fibres (quatre) à manipuler. Ainsi, il est plus aisé de maîtriser la distance entre deux fibres. La mesure du temps entre une sollicitation successive de chaque fibre témoigne de la vitesse du conducteur. Cette solution implique le développement d'une solution dédiée. Par ailleurs, la vitesse d'avancement du véhicule sur le réseau influe sur la vitesse d'évolution de la contrainte sur celui-ci. Cette courbe de déformation du réseau de Bragg renferme l'information de la vitesse du véhicule dans la pente de la courbure. Une étude plus poussée doit permettre d'extraire cette vitesse de cette manière.

La longueur d'onde du réseau de Bragg varie environ de 1,2 pm par $\mu\epsilon$ et de 10 pm par $^{\circ}\text{C}$ (pour une longueur d'onde dans le proche infra-rouge). La mesure de la contrainte s'effectue en s'affranchissant de la variation du capteur à la température. Pour cela, un étalonnage régulier des longueurs d'onde de Bragg est nécessaire. Ces étalons ou références peuvent également indiquer la température de la résine, matériau les entourant et ainsi avoir une information de la température atmosphérique.

Le conditionnement de ce capteur dans la résine n'est pas sans risque. Les longueurs d'onde de Bragg sont augmentées. Dans certains cas, la dégradation du réseau rend sa longueur d'onde non mesurable. Il est donc nécessaire d'effectuer un relevé de l'ensemble des longueurs d'onde

après avoir conditionné le capteur dans la résine pour ensuite être capable d'observer des variations suite à sa sollicitation par un objet externe.

Bien que ce capteur soit intéressant, il n'en reste pas moins que sa fabrication et le coût de l'équipement sont à un prix élevé. Pour le moment, son usage n'est pas déployé en grande quantité. L'avancement des technologies et des techniques dans l'optoélectronique en fait un capteur prometteur. En attendant ces évolutions, nous avons conçu un nouveau capteur résistifs dont l'objectif est d'éviter ces problèmes.

8.

Le capteur résistif innovant

8.1 Description

Ce capteur résistif se comporte comme un long potentiomètre. Un véhicule roulant sur celui-ci change la valeur de sa résistance. Cette variation est linéaire par rapport à la position physique de la contrainte. Ce capteur, entièrement conçu à l'ESEO, a été imaginé avec l'objectif de développer un capteur à faible coût, satisfaisant les contraintes données en sous-partie 3 page 15. Il a fait l'objet d'un dépôt de brevet [[Plainchault et Aubin, 2009](#)].

Il est constitué d'un fil résistif (2 sur la figure 8.1) placé dans le filetage (1 sur la figure 8.1) d'une tige filetée (5 sur la figure 8.2). Le diamètre du fil a été étudié pour s'insérer dans le filetage mais sans jamais dépasser le diamètre de la tige. La tige filetée est entièrement bobinée. Cette tige vient se loger dans un tube (3 de la figure 8.1) dont la paroi interne (4 sur la figure 8.1) est conductrice de courant. Ce tube a la particularité d'être « souple » et conducteur. Ce dernier est réalisé par le dépôt d'une fine couche de peinture conductrice sur la paroi interne de ce tube (MAPELEC[®] SSS-50 de l'entreprise MAP). Après avoir réalisé une saignée dans la chaussée, le capteur est inséré puis recouvert d'une résine spéciale, identique à celle utilisée pour les fibres optiques.

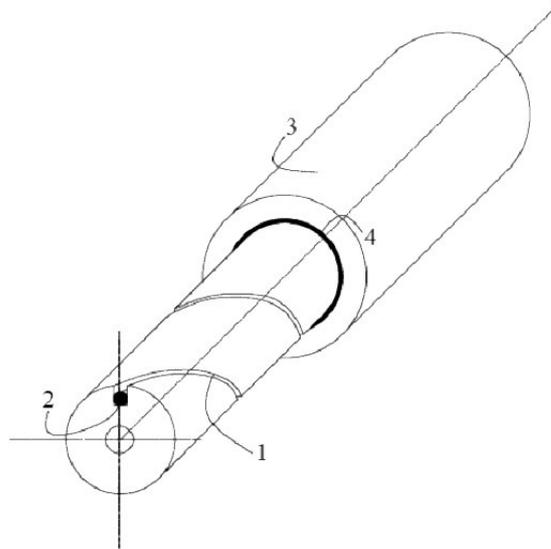


FIGURE 8.1 – Schématisation du capteur résistif.

Lors du passage d'un véhicule, le tube se déforme comme le présente la figure 8.2. La paroi interne (4) entre en contact avec le fil résistif logé à l'intérieur du filetage, engendrant un court-circuit d'une partie de la résistance totale. Pour le présent capteur, la paroi interne est enduite de peinture conductrice.

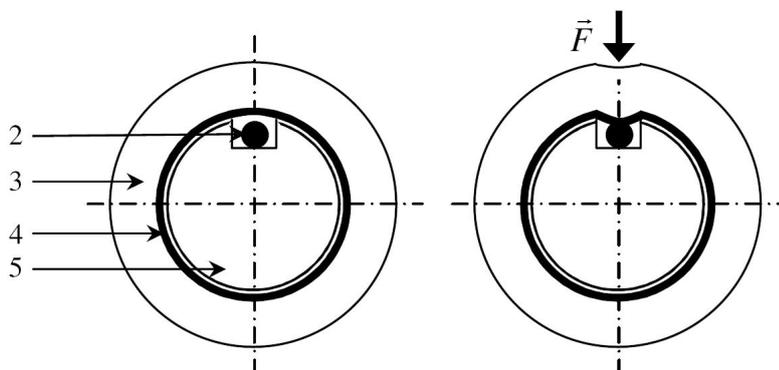


FIGURE 8.2 – Coupe de face du capteur avant (figure gauche) et après contrainte (figure droite).

Dans le cas où plusieurs pressions sont exercées sur le capteur, seule la pression la plus proche de l'électronique d'acquisition est retenue. Le système d'acquisition du capteur est placé dans le bas côté de la route. Si ce capteur est installé dans la chaussée, perpendiculairement à l'axe sur lequel avance un véhicule, la carte électronique le positionne à partir de l'extérieur de son pneu droit. Des améliorations offrent la possibilité de détecter l'extérieur de son pneu droit et gauche en partant de la même électronique. Pour cela, le capteur est connecté à chaque extrémité à un système d'acquisition. Chacun d'eux repère les objets présents sur le capteur suivant le point de contact le plus proche du système. Ils s'intègrent facilement sur une même carte électronique.

8.2 Le système d'acquisition et de conditionnement

Son schéma électronique (figure 8.3) est conçu à partir d'un pont de Wheatstone. La mesure est effectuée avec un simple microcontrôleur intégrant notamment un Convertisseur Analogique Numérique (CAN). Ce simple dispositif constitue un matériel fiable et économique en terme d'énergie (environ 50 mA sous 12V pour le premier prototype) et en équipement électronique (composants peu onéreux). La carte électronique peut acquérir les mesures de deux capteurs différents.

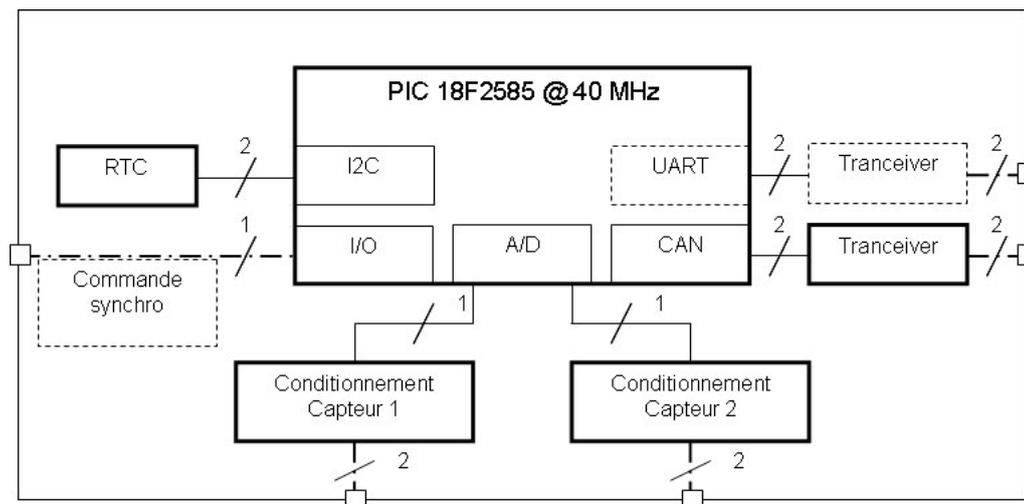


FIGURE 8.3 – Architecture matérielle de la carte d'acquisition.

Les capteurs réalisés entrent dans la catégorie des capteurs passifs. Le système d'acquisition doit répondre aux mêmes contraintes de fréquence d'échantillonnage que dans le paragraphe 6.2.

La mesure de la résistance s'effectue au moyen d'un pont de Wheatstone linéarisé [Asch *et al.*, 1998]. La sortie de ce pont permet d'obtenir une variation de tension proportionnelle à la variation de la résistance. Par une sélection correcte de nos composants en fonction de la longueur du capteur réalisé, la sortie du pont varie de 0 V à 2,5 V. Avant d'effectuer la conversion analogique/numérique sur 10 bits, un filtre RC permet de couper les hautes fréquences et les parasites. Pour affiner le quantum, la conversion s'effectue entre 2,7 V et la masse. Cette tension est générée par une diode Zener de 2,7 V.

Au final, le système d'acquisition produit un résultat qui mesure l'évolution d'une résistance par pas de 2,4 Ω . Ramené à la mesure de distance, l'électronique associée au capteur possède une précision de 0,8 cm.

Plusieurs modes de fonctionnement sont proposés : acquisition rapide de données, synchronisation temporelle, acquisition de position, calibrage, debug... L'ensemble des informations est disponible via une connexion fondée sur un réseau utilisant le protocole de communication dénommé *Controller Area Network (CAN)* [PARET, 1999]. Plusieurs cartes électroniques peuvent

être mises sur le même réseau et remonter leurs informations vers un unique superviseur. Ce bus CAN est fondé sur son propre protocole CAN respectant le modèle OSI de l'ISO. Il utilise une communication série et supporte des systèmes temps réel avec un haut niveau de fiabilité. Le non déterminisme est l'inconvénient principal du protocole CAN. Cependant, il assure à l'utilisateur que le message finira par arriver à destination à l'exception d'erreur ou de surcharge sur le bus. Dans la présente application, cet inconvénient ne remet pas en cause son utilisation dans la mesure où les informations sont horodatées directement par la carte électronique.

Le temps de transfert de l'information vers une centrale de recueil des données n'est pas un paramètre primordial du système. Néanmoins toutes les cartes doivent avoir la même horloge à la centième de seconde près. En effet la précision sur la mesure de la vitesse d'un véhicule dépend à la fois de la précision du système électronique à mesurer le temps et de la précision de la mesure de la distance entre deux capteurs. Pour cela, elles ont la possibilité de se synchroniser afin de coordonner leur horloge interne. La fréquence de synchronisation et l'heure « vraie » sont données par un superviseur qui coordonne l'ensemble des cartes.

Grâce à ce réseau de capteurs, l'interconnexion entre plusieurs entités est simple à mettre en oeuvre et le coût est modeste. Une estimation de la charge du bus a été réalisée afin de s'assurer que les échanges permettraient de recueillir toutes les données. La vitesse de communication choisie est de 100 Kbit/s. Les échanges sont autorisés suivant une politique de répartition du temps de parole entre les différentes cartes (ou noeuds). D'autres facteurs ont également été pris en compte dans la mise en place de ce réseau, comme la distance entre les capteurs et le superviseur, ainsi que l'immunité aux perturbations électromagnétiques.

8.3 La linéarité du capteur

Le système réalisé a fait l'objet de différents tests. Le premier a permis de valider la bonne réaction du capteur, suite à l'exercice d'une pression. Le deuxième test vérifie sa linéarité.

Dans cette étape, des mesures ont été prises tous les 10 cm. La valeur numérique mesurée par le microcontrôleur est directement reportée dans un tableau. En parallèle, la même mesure est recueillie par un ohmmètre¹ positionné sur le calibre 2 000 Ω . Le capteur est marqué tous les 10 cm et une mesure est alors relevée. La pression est exercée ici par une pince à tête fine pour minimiser les erreurs dues à son mauvais positionnement. La force de pincement est suffisamment importante pour réaliser un contact franc entre la paroi interne et le fil résistif. Cela permet de déplacer le capteur sans rupture du contact. L'ensemble des relevés est affiché sur le graphique 8.4. Il présente les valeurs recueillies en sortie du CAN pour deux systèmes complets (carte + capteur) ainsi que les valeurs recueillies par l'ohmmètre pour le capteur n°1.

1. L'appareil de mesure utilisé est le multimètre ITT metrix MX 562, 2 000 points, précision de 0,1 %.

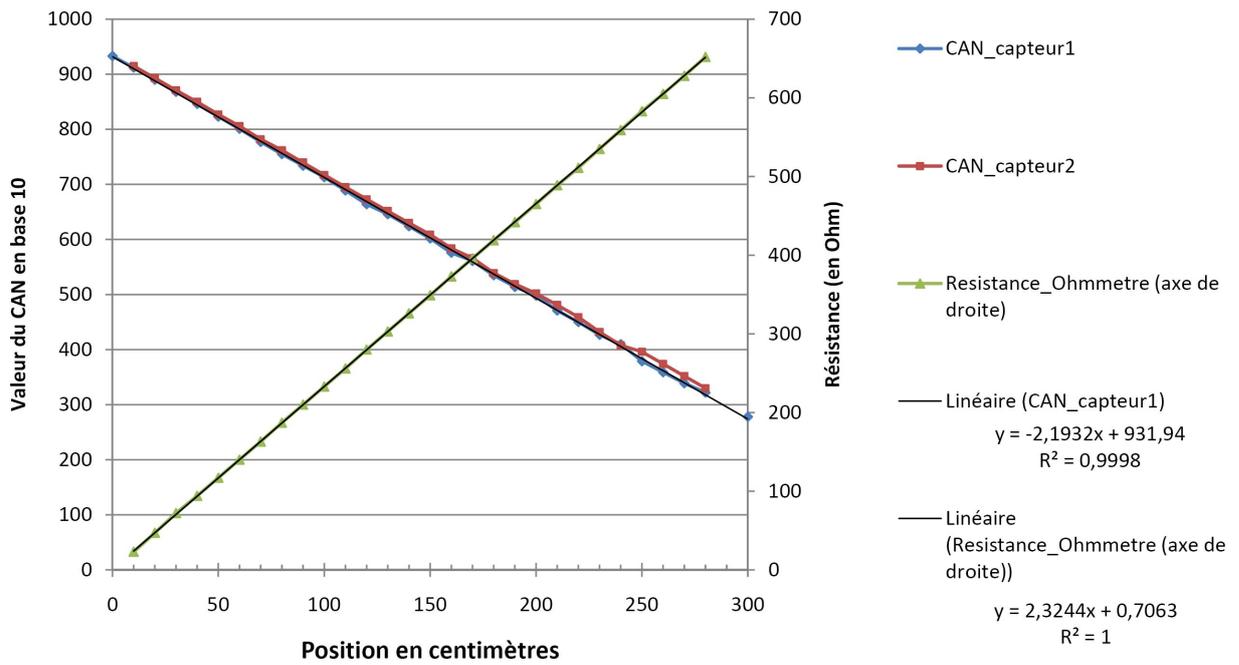


FIGURE 8.4 – Étude des mesures en sortie du CAN de deux capteurs par des appareils différents (carte électronique, échelle de gauche et ohmmètre, échelle de droite) en fonction de la position du point d'impact sur le capteur.

Quelle que soit l'électronique d'acquisition, carte dédiée ou ohmmètre, la position varie bien linéairement. La régression linéaire de ces valeurs fournit une équation du premier ordre. Le passage d'une mesure numérique à une position s'effectue par la relation :

$$position_{cm} = \frac{931,944 - mesure_{CAN}}{2,193} \quad (8.1)$$

Les mesures à l'ohmmètre sont meilleures que celles réalisées par le système d'acquisition : le facteur R^2 vaut 1 pour l'ohmmètre contre 0,9998 pour la carte électronique. L'erreur entre la position réelle et la position calculée par la droite de régression est représentée sur le graphique 8.5.

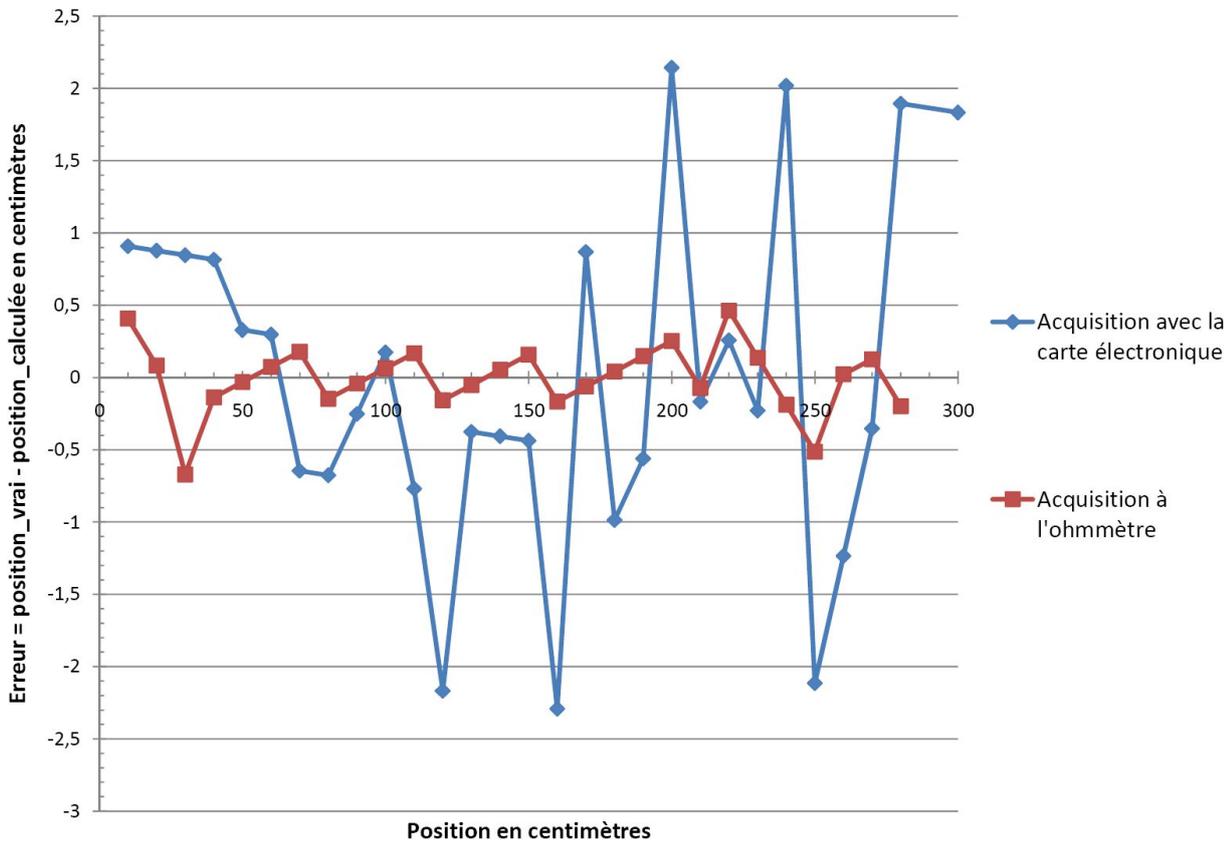


FIGURE 8.5 – Erreur de mesure de la position liée à l'utilisation de la droite de régression linéaire pour la mesure effectuée avec la carte électronique (en losange bleu) et pour la mesure effectuée à l'ohmmètre (en carré rouge).

Sur les capteurs testés, l'erreur liée à l'utilisation de la droite de régression est bornée entre -2,5 et 2,5 cm. La moyenne de cette erreur vaut -0,01 et son écart type est de 1,2. Ainsi, 95 % des mesures ont une erreur de $\pm 1,2$ cm.

Pour les mesures effectuées à l'ohmmètre, l'utilisation de la droite de régression linéaire entraîne une erreur comprise en -0,67 et 0,46 cm. La moyenne de cette erreur vaut -0,002 et son écart type est de 0,24. Ainsi l'ohmmètre localise un objet sur le capteur avec une précision de 1,1 cm. 95 % des mesures ont une erreur comprise dans l'intervalle $[-0,23 ; 0,23]$.

Sur trois capteurs associés à leur carte électronique, le coefficient directeur de leur droite de régression et son *offset* varient de moins de 1 %. En gardant la même courbe de régression pour tous les capteurs, la position est alors calculée avec une erreur d'environ 10 cm. Ces changements sont dus à la résistance du conducteur de retour, aux différences entre les tensions d'alimentation ainsi qu'aux différences entre les tensions de référence prises aux bornes de la diode Zener. Une couche de peinture supérieure ou inférieure de quelques micromètres recouvrant la paroi interne et/ou une répartition non de cette même peinture homogène entraînent des différences de conductivité entre les différents tubes. Les variations de résistance entre les capteurs dues au bobinage du fil résistif sont faibles : moins de 2Ω pour une tige filetée de

3 m. Un étalonnage de chaque capteur est donc nécessaire pour reconstituer plus précisément les positions.

Pour une position fixée, mesurée 50 fois, le système d'acquisition la renvoie avec une fourchette de cinq quanta. Si la valeur est moyennée huit fois sans temps d'attente entre deux échantillons, la valeur retournée ne varie que d'un quantum.

8.4 La modélisation du capteur

8.4.1 Présentation

Ce capteur a été pensé et conçu comme un système présentant une résistance variable suivant la localisation de la contrainte. Un des moyens direct pour mesurer cette variation de résistance repose sur l'acquisition numérique de signaux analogiques (courant/tension) prise au niveau de la résistance. D'autres solutions existent comme l'utilisation d'un pont de Wheatstone vu précédemment. Ces solutions utilisent des signaux continus. Le bruit est souvent gênant lors de ces mesures. Une parade consiste à mesurer la résistance en se basant sur un signal alternatif. Un pont « P/Q » peut alors être employé ou même un système oscillant qui mesure la fréquence d'oscillation. Les circuits se complexifient. Il est alors préférable de prévoir le comportement du capteur au sein de l'architecture électronique. Une étude du capteur et l'élaboration de son modèle permet de détailler ces aspects.

8.4.2 Les caractéristiques techniques du capteur

Ce capteur résistif de longueur L est composé d'un long fil résistif enroulé dans le filetage d'une tige filetée en nylon. Le fil présente des spires régulières et serrées. Lors de la fabrication du capteur, les paramètres suivants ont été choisis :

- l_{tf} : longueur de la tige filetée = 3 m ;
- d_{tf} : diamètre de la tige filetée = 5 mm (M5) ;
- P : pas du filetage = 0,8 mm ;
- μ_{nylon} : perméabilité de la tige filetée en nylon = $1 \text{ V.A}^{-1}.\text{m}^{-1}$;
- d_{fr} : diamètre du fil résistif en nickel-chrome (75%Ni - 25%Cr) = 0,315 mm (30 SWG) et de résistance linéique = $res_{fil-lin}$ 13,858 Ω/m ;
- d_{tic} : tuyau conducteur de diamètre interne = 6,3 mm
- d_{tac} : tuyau conducteur de diamètre externe = 11,0 mm ;
- l_{tc} : longueur du tuyau conducteur = 3,03 m ;
- res_{surf} : résistance de surface du conducteur pour une couche de peinture d'une dizaine de μm = 0,03 Ω/m^2 .

L'utilisation d'une tige filetée de type M5 influe sur différents paramètres comme le pas, la profondeur du filetage... Le pas du filetage étant de 0,8 mm dans sa version actuelle, la sensibilité du capteur est donc bien supérieure à la mesure recherchée.

A titre d'indication, pour une tige filetée M5, le diamètre maximale autorisé avant que le fil résistif ne soit pas complètement immergé dans le filet est de 0,491 mm. Le diamètre de fil choisi est bien inférieur pour éviter tout problème lors de sa pose dans le filetage et pour tenir compte des tolérances de fabrication de la tige en nylon.

Le constructeur de la tige précise qu'il respecte la norme allemande isométrique DIN 975. Cependant, cette norme allemande, spécifique pour décrire les filets de vis ou des tiges filetées, n'a pas abouti et est toujours inachevée. La norme française de 1959 NF E 03-001 précise le profil métrique ISO pour une grande majorité des pièces filetées (vis, taraudage...). Ce filetage présente la caractéristique d'être un filet triangulaire. Pour la suite, la norme NF E 03-001 est utilisée à la place de la norme DIN 975, interchangeable bien évidemment. Elle est décrite dans l'annexe C.

Cette norme définit le filet triangulaire utilisé lors de la fabrication de notre tige filetée M5. Les notations suivantes sont utilisées :

- D, d : diamètre nominal ;
- P : pas ;
- H : hauteur du triangle primitif ;
- D1, d1 : diamètre du fond de filet du taraud ;
- D2, d2 : diamètre à flancs de filet ;
- d3 : diamètre du noyau de la vis ;
- H1 : profondeur du filet du taraud ;
- h3 : profondeur du filet de la vis.

8.4.3 La modélisation par une ligne de transmission à constantes localisées

8.4.3.1 Les caractéristiques du modèle

Dans une première approche, une modélisation par un modèle de ligne de transmission à constantes localisées a été choisie. Cela suppose que ce système puisse être vu comme la mise en série de trois éléments passifs : une résistance, une inductance et une capacité. La tension de sortie est prise aux bornes de la capacité (figure 8.6).

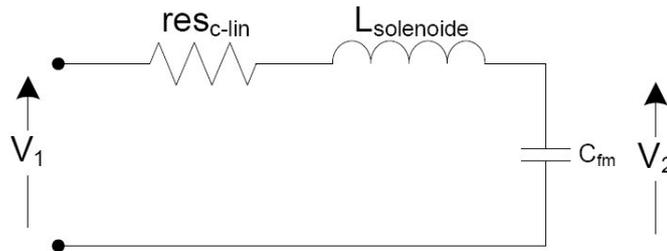


FIGURE 8.6 – Schéma du modèle d'une ligne de transmission à constantes localisées.

Pour trouver les valeurs de ces différents éléments, les hypothèses suivantes sont émises :

- la valeur de la résistance est due au fil résistif ;
- l'effet inductif est généré par le long solénoïde à spires non jointives, enroulé sur du nylon et fermé à l'infini ;
- l'effet capacitif provient du fil résistif en vis-à-vis avec le conducteur de retour. L'effet capacitif entre les spires est considéré comme négligeable devant le premier effet capacitif. Dans le premier cas, le milieu diélectrique est constitué d'air avec une différence de potentiel de plusieurs volts. Dans le deuxième cas, le milieu diélectrique est composé de nylon et entre deux spires, les potentiels restent voisins. La distance entre le fil résistif et le conducteur de retour fluctue entre une valeur proche de 0 et 1 mm comme expliqué par la suite. La distance entre deux spires équivaut au pas du filetage.

8.4.3.2 La valeur de la résistance

D'après la conception de ce capteur, l'effet résistif est principalement dû au fil. La peinture conductrice recouvrant l'intérieur d'un tube en caoutchouc et servant de conducteur de retour peut également être prise en compte. Cependant sa valeur est faible par rapport à la résistance engendrée par le fil résistif.

La résistance due au fil résistif

La mesure de la résistance due au fil résistif dépend de sa longueur. La longueur du fil est liée à la longueur de la tige filetée ainsi qu'à sa position dans le filetage. Le fil se positionne dans le filet à condition bien sûr que son diamètre soit en adéquation avec la base du triangle isocèle représentant le filet. Dans le cas où le fil repose sur les parois du triangle, alors le centre de son rayon $r_{fil-center-tige}$ par rapport au centre de la tige filetée est donné par l'équation 8.2.

$$r_{fil-center-tige} = \frac{d_{tf}}{2} + \frac{d_{fr}}{2} - \frac{17}{24} \cdot \frac{P \cdot \sqrt{3}}{2} \quad (8.2)$$

Le calcul de la résistance linéique $res_{fil-c-lin}$ s'effectue en multipliant la longueur de fil nécessaire pour réaliser un capteur de 1 m par la résistance linéique $res_{fil-lin}$. Cette longueur

de fil est donnée par la formule donnant la longueur d'une hélice de pas P et de hauteur 1 m. Ainsi $res_{fil-c-lin}$ est donnée par l'équation 8.3.

$$res_{fil-c-lin} = \frac{\sqrt{r_{fil-center-tige}^2 + \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2}}{\frac{P}{2\pi}} \cdot res_{fil-lin} \quad (8.3)$$

L'application numérique donne : 236,2 Ω /m de capteur.

La résistance formée par le conducteur de retour

Cette résistance se calcule en effectuant le produit de la résistance surfacique par la surface peinte, c'est-à-dire celle d'un cylindre de 3 m de longueur. Le constructeur fournit uniquement une résistance surfacique pour l'application d'une couche de peinture dont l'épaisseur représente une dizaine de micromètres. Ainsi, l'épaisseur n'est pas prise en compte dans ce calcul.

$$res_{cr} = \pi \cdot d_{tic} \cdot l_{tc} \cdot res_{surf} \quad (8.4)$$

L'application numérique donne : $0,6 \cdot 10^{-3}$ Ω par mètre de capteur.

Bilan

La résistance totale res_{c-lin} est la somme des deux résistances res_{cr} et $res_{fil-c-lin}$, soit 236,2 Ω /m. Ce calcul donne une valeur de résistance supérieure à celle donnée par l'ohmmètre : 233 Ω . Cette erreur est faible : environ 1 %. L'erreur provient en majeure partie du positionnement du fil résistif dans le filet. Un filet plus profond de 0,5 mm entraîne sur les 3 m du capteur une baisse de la résistance de 15 Ω environ. A l'inverse, la résistance formée par la peinture conductrice dans les tubes a une résistance beaucoup plus faible que la résistance mesurée par l'ohmmètre. Selon ces tubes, la résistance varie de 8 Ω à ± 5 Ω pour une longueur de 4,5 mètres, alors que pour cette même distance le calcul donne 0,02 Ω . Cet écart important s'explique par la technique de pose de la peinture. En effet, cette dernière a été coulée dans le tube entraînant une sur-épaisseur par rapport à la dizaine de micromètres indiquée dans sa documentation technique. La résistance aurait donc dû diminuer. La non-homogénéité du dépôt explique cette différence de résultat.

8.4.3.3 La valeur de l'inductance

L'effet inductif est généré par le long solénoïde. Ce dernier est formé par le bobinage du fil autour de la tige en nylon et considéré comme infini au regard de sa longueur (longueur du capteur) bien supérieure au diamètre de la tige en nylon. La formule 8.5, décrivant l'inductance dans un solénoïde infiniment long, est applicable :

$$L_{solenoid} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot S}{l_{tf}} \quad (8.5)$$

avec $L_{solenoid}$ l'inductance du solénoïde, μ_0 la perméabilité du vide, μ_r la perméabilité de la matière composant le noyau du solénoïde, N le nombre de spires, S la section.

Dans le cas de ce capteur, le nombre de spires est déterminé par le ratio entre la longueur de la tige et le pas du bobinage. La tige filetée possède un pas de 0,8 mm. Pour un capteur de 3 m de long, le nombre de spires est de 3 750. L'application numérique de l'équation 8.5 indique une inductance de 85 μ H. L'inductance linéique est de 28,3 μ H/m.

Par mesure à l'inductancemètre, l'inductance du fil bobiné à 30 kHz vaut 150 μ H. Cette valeur est obtenue pour une tige filetée en nylon de 3 m ayant une forme rectiligne. En respectant les mêmes conditions de mesure, l'inductance de cette tige a été prise en changeant uniquement la configuration de la tige. Cette dernière a été enroulée de manière à réaliser quatre tours. L'inductance mesurée est de 90 μ H à 30 kHz. Le changement de forme de la tige a engendré une variation de sa valeur inductive.

8.4.3.4 La valeur de la capacité

Pour créer une capacité, il est nécessaire d'avoir deux corps électrisés proches. La capacité générale du capteur est constituée par :

- le fil résistif et le conducteur de retour ;
- deux spires côte-à-côte ;
- la spire elle-même.

Les valeurs des deux dernières capacités sont considérées comme négligeables par rapport à la première. En effet, la différence de potentiel entre deux spires ou entre le fil formant une spire est faible. A titre indicatif, il est possible d'estimer la capacité entre deux spires par la formule décrivant la capacité de deux conducteurs parallèles infiniment longs, placés dans un milieu homogène, séparés d'une certaine distance. L'approximation de cette capacité est réalisée en considérant uniquement la séparation entre le fil résistif et la paroi interne du tube. Le matériau diélectrique est formé par de l'air.

Le fil résistif est enroulé autour d'une tige. Pour faciliter les calculs de la capacité linéique C_{fm} , ce fil résistif est considéré comme étant positionné en moyenne au niveau de l'axe central de la tige et dans un milieu homogène : l'air. La longueur équivalente du fil est celle nécessaire pour former un capteur de 1 m (déroulage des spires).

La détermination des potentiels sur les différents conducteurs permet d'obtenir facilement la capacité. Ce calcul est souvent effectué en considérant l'écriture du champ électrique ou l'équation de Laplace ou de Poisson. Les différentes équations se résolvent par des méthodes analytiques ou numériques. Dans le cadre de ce problème complexe, une résolution directe est difficile. Différentes méthodes sont proposées :

- une transformation conforme [Gardiol, 1977] ;
- une approche numérique, notamment par éléments finis [Gardiol, 1977] ;
- une approche analytique grâce à la méthode des images [Georges, 2001].

L'approche analytique par la méthode des images a été choisie en raison de sa simplicité et du résultat sous forme analytique. Cette méthode est fondée sur le principe de superposition. Une charge inverse à la charge du conducteur est placée symétriquement au conducteur dont le potentiel est relié à la masse. Ainsi, le champ électrique n'est ainsi pas modifié, mais la géométrie du système permet un calcul parfois plus simple.

Cette méthode a été appliquée dans [Stojanovic *et al.*, 2006] et [Heinhold, 1993]. La capacité linéique fil-masse C'_{fm} est définie par :

$$C'_{fm} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln\left(\frac{\left(\frac{d_{tic}}{2}\right)^6 - \left(\frac{d_{tic}}{2} - \frac{d_{tf}}{2}\right)^6}{3 \cdot \left(\frac{d_{tic}}{2} - \frac{d_{tf}}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{d_{tic}}{2}\right)^3 \cdot \frac{d_{fr}}{2}}\right)} \quad (8.6)$$

A partir de l'équation 8.6, la capacité linéique du capteur devient :

$$C_{fm} = C'_{fm} * l_{FilPr1m} \quad (8.7)$$

avec $l_{FilPr1m}$ la longueur du fil nécessaire pour fabriquer un capteur de 1 m.

La capacité linéique C_{fm} du capteur vaut : 187,7 pF/m.

8.4.3.5 Bilan

La modélisation du capteur résistif par constantes localisées a permis de calculer les paramètres linéiques suivants :

- une résistance de 236,2 Ω /m ;
- une inductance de 28,96 μ H/m ;
- une capacité de 187,7 pF/m.

Cette première approche simple permet d'avoir un aperçu des grandeurs électriques constituant ce capteur. L'atténuation de la ligne (paramètre 1/A dans les paramètres ABCD d'un quadripôle) a été mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel disponible au sein du laboratoire (Agilent 8753, analyse de 30 kHz à 6 GHz).

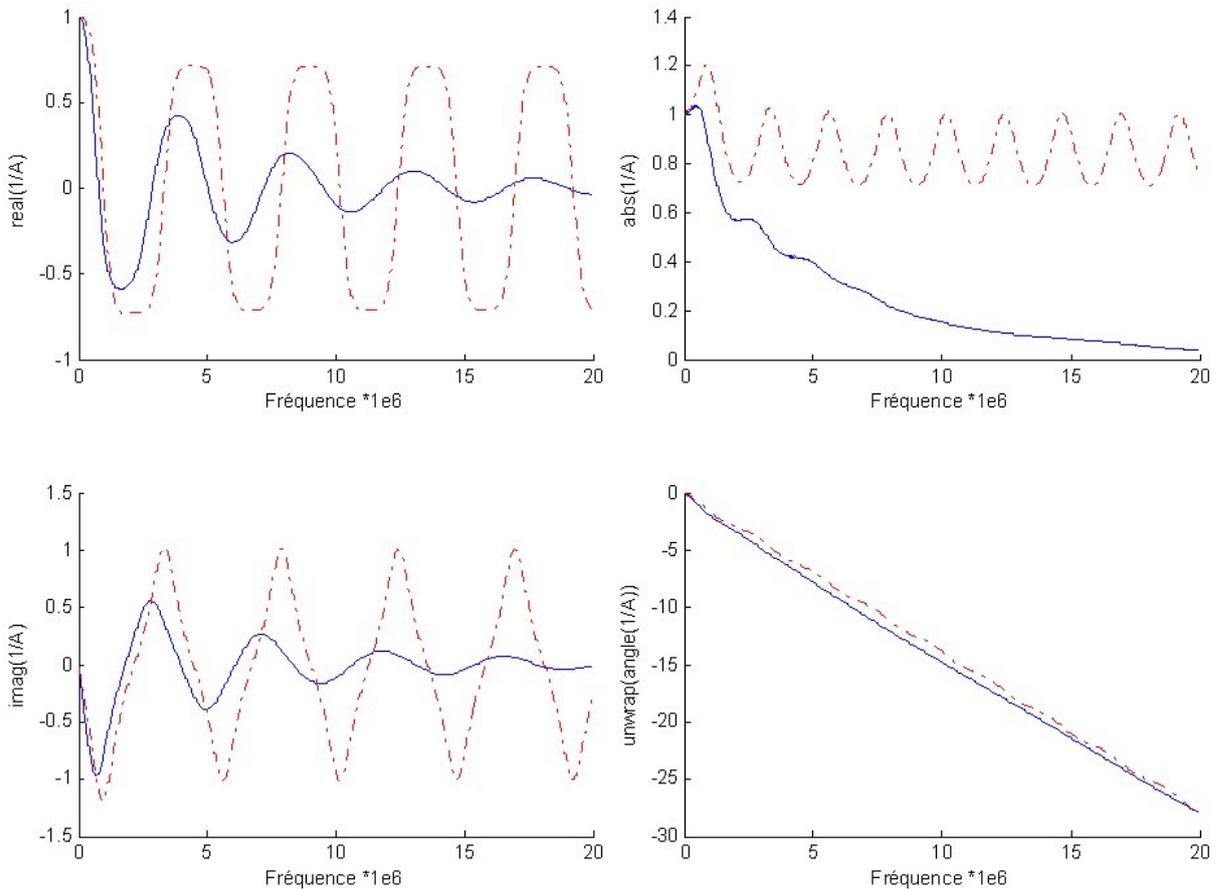


FIGURE 8.7 – Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre $(1/A)$ sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein et la partie obtenue par le modèle à constantes localisées est en rouge, trait discontinu.

La figure 8.7 montre que le modèle donné ne correspond pas au capteur réel. Une sensibilité à la fréquence et une forte atténuation sont présentes. L'étude du capteur par un modèle plus complexe s'impose.

8.4.4 La modélisation par une ligne de transmission à constantes uniformément réparties

Une ligne de transmission à constantes uniformément réparties permet de modéliser plus finement ce capteur. L'utilisation de ce modèle suppose que le système soit linéaire. La linéarité d'un système se vérifie en introduisant en entrée un signal pur, par exemple sinusoïdal. Si la sortie révèle un signal sans harmonique supplémentaire, alors le système est linéaire.

D'une manière générale, le modèle d'une ligne de transmission à constantes réparties décrit la ligne sous la forme d'une succession d'éléments infinitésimaux (figure 8.8). Dans la construction du capteur, sa sortie est mise en court-circuit afin de fixer ses paramètres.

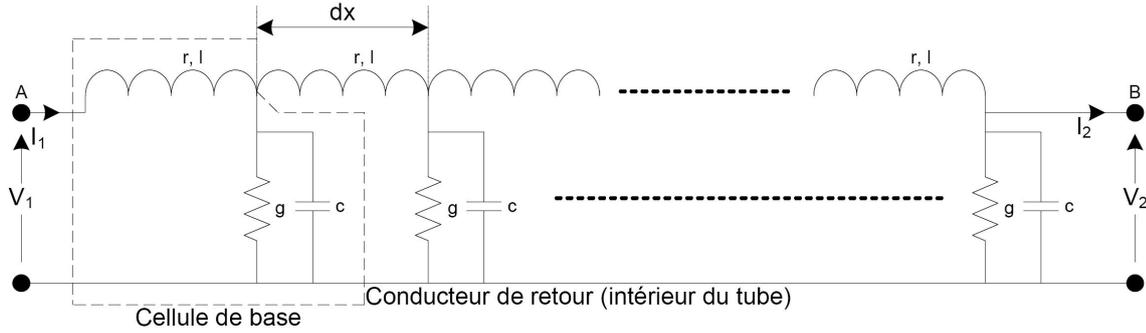


FIGURE 8.8 – Présentation d’une ligne à constantes uniformément réparties.

Les problèmes de lignes à constantes réparties sont résolus en étudiant une cellule de base. Cette cellule de longueur dx est caractérisée par les grandeurs linéiques :

- r : résistance longitudinale uniformément répartie ;
- l : inductance propre uniformément répartie ;
- g : conductance transversale uniformément répartie ;
- c : capacité électrostatique uniformément répartie.

L’étude de cette ligne repose sur l’analyse d’une cellule généralisée à travers l’équation des télégraphistes en régime quelconque [Moreau, 1970].

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = r g v + (r c + l g) \frac{\partial v}{\partial t} + l c \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r g i + (r c + l g) \frac{\partial i}{\partial t} + l c \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases} \quad (8.8)$$

L’équation 8.8 est obtenue en différenciant l’équation donnée par la loi d’Ohm et l’équation de la variation de la quantité d’électricité appliquée à l’élément de longueur dx . En excitant le circuit par une tension sinusoïdale de pulsation ω , l’équation des télégraphistes s’écrit alors sous forme complexe suivant l’équation 8.9 :

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{V}}{\partial x^2} = \Gamma^2 \cdot \underline{V} \\ \frac{\partial^2 \underline{I}}{\partial x^2} = \Gamma^2 \cdot \underline{I} \end{cases} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \alpha = r + j l \omega \\ \beta = g + j c \omega \\ \Gamma = \sqrt{\alpha + j \beta} \end{cases} \quad (8.9)$$

Γ est la constante de propagation de la ligne, α est la constante d’atténuation et β représente la constante de déphasage. Γ se décompose suivant le rapport suivant : $\frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$ avec ω la pulsation, c la célérité de la lumière et λ la longueur d’onde du signal.

\underline{V} et \underline{I} proviennent de la résolution d’une équation différentielle unique dont les solutions générales satisfont le système 8.10.

$$\begin{cases} \underline{V} = \underline{M}e^{\Gamma \cdot x} + \underline{N}e^{-\Gamma \cdot x} \\ \underline{I} = \frac{\underline{M}}{\underline{Z}_c}e^{\Gamma \cdot x} - \frac{\underline{N}}{\underline{Z}_c}e^{-\Gamma \cdot x} \end{cases} \quad (8.10)$$

avec \underline{M} et \underline{N} , les constantes d'intégration. Le point A sur la figure 8.8 désigne l'abscisse à l'origine : $x = 0$. Cette condition permet, grâce à l'équation 8.10, d'exprimer \underline{M} et \underline{N} en fonction de la tension et du courant d'origine V_1 et I_1 . Ainsi, l'équation caractérisant le fonctionnement des lignes à constantes réparties s'écrit :

$$\begin{cases} \underline{V} = \underline{V}_1 \cdot \cosh(\Gamma \cdot x) + \underline{Z}_c \cdot \underline{I}_1 \cdot \sinh(\Gamma \cdot x) \\ \underline{I} = \underline{V}_1 \cdot \frac{\sinh(\Gamma \cdot x)}{\underline{Z}_c} + \underline{I}_1 \cdot \cosh(\Gamma \cdot x) \end{cases} \quad (8.11)$$

avec \underline{Z}_c l'impédance caractéristique définie comme le rapport $\underline{V}_1/\underline{I}_1 = -\underline{V}_2/\underline{I}_2$. Cette impédance s'écrit encore :

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \quad (8.12)$$

Une transformation simple permet également d'écrire l'équation 8.11 sous la forme de l'équation 8.13 pour une longueur de capteur $x = L$:

$$\begin{pmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma \cdot L) & \underline{Z}_c \cdot \sinh(\Gamma \cdot L) \\ \frac{\sinh(\Gamma \cdot L)}{\underline{Z}_c} & \cosh(\Gamma \cdot L) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (8.13)$$

L'identification des paramètres r , l , c et g s'effectue en associant ce modèle de ligne à des mesures physiques, l'objectif étant de faire correspondre le modèle à l'expérimentation. La cellule élémentaire des lignes de transmission classique a été redéfinie comme le montre la figure 8.9. Le paramètre g est considéré comme négligeable (très proche de 0). Une résistance sensible à la fréquence a été ajoutée en série avec la résistance initiale. Sa valeur se présente comme le produit de ω , de la résistance initiale et d'un coefficient α altérant l'ensemble.

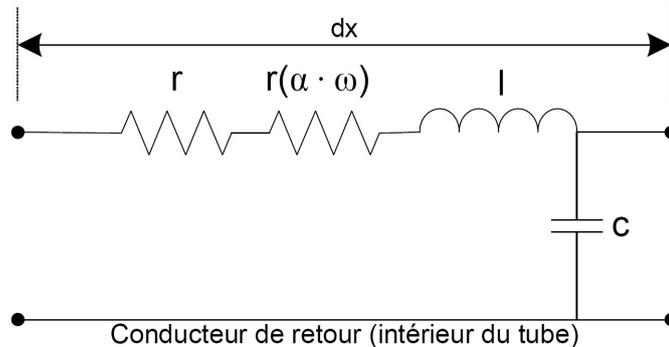


FIGURE 8.9 – Cellule de base utilisée dans notre modèle de ligne de transmission.

Cette cellule élémentaire est vue comme un quadripôle dont les paramètres ABCD sont décrits suivant l'équation 8.13. Les paramètres ABCD mettent en relation la tension et le courant

d'entrée en fonction de la tension et du courant de sortie. Les paramètres S caractérisant ce quadripôle et donc le capteur résistif sont obtenus via un analyseur de réseau vectoriel. Les paramètres S décrivent les ondes réfléchies en entrée et en sortie, en fonction des ondes injectées en entrée et en sortie. Afin de comparer des données identiques, les paramètres S sont transformés en paramètres ABCD grâce aux formules données dans [Frickey, 1994]. Les mesures sont relevées par l'analyseur vectoriel entre 30 kHz à 5 MHz avec un pas de 12,5 kHz. Le calibrage de l'analyseur a été réalisé en tenant compte des connecteurs et de la longueur des câbles nécessaires pour se brancher en entrée et en sortie du capteur. La fréquence de mesure minimale est définie par les possibilités de l'analyseur. La fréquence maximale a été choisie afin de limiter l'apparition d'effets liés à l'utilisation des hautes fréquences (bruit, l'effet Kelvin appelé également effet de peau).

L'algorithme d'identification consiste, à partir d'une méthode d'optimisation, à minimiser la différence des fonctions définies par les paramètres ABCD pour le modèle de ligne variant par rapport à r , l , c et α et par les paramètres ABCD provenant des mesures physiques. L'écart entre le modèle pour des valeurs de r , l , c et α données et les paramètres de la matrice ABCD mesurés indique la justesse des paramètres. La réduction de cet écart donne la solution au problème de caractérisation de la cellule de base. La méthode utilisée est celle des moindres carrés. Elle compare des valeurs théoriques avec des valeurs expérimentales par une différence, le tout élevé au carré (différence au carré). Dans le cas présent, les fonctions à minimiser sont non linéaires (différences de fonctions hyperboliques). Sa résolution utilise un algorithme proche de celui de Gauss-Newton (itération d'un pas défini par la dérivée de la fonction). La solution recherchée est atteinte lorsque le minimum de la somme de chaque écart au carré est détecté :

$$\min_X(f(X)) = f_1^2(X) + f_2^2(X) + \dots + f_m^2(X) \quad (8.14)$$

La résolution d'un problème non linéaire présente souvent plusieurs minimaux. Les conditions initiales jouent un rôle prépondérant dans l'éventuelle découverte du minimum s'inscrivant dans les limites du système. Les calculs réalisés sur la modélisation du capteur à constantes localisées forment une base pour le choix des paramètres initiaux.

L'identification est réalisée grâce aux paramètres A et B sur la plage de fréquences de 30 kHz à 5 MHz. 400 mesures sont prises sur cet intervalle et l'identification s'effectue séparément sur la partie imaginaire et sur la partie réelle de chaque paramètre. Au final, l'optimisation consiste à minimiser une somme de 1 600 fonctions dépendant de quatre paramètres.

$$\begin{aligned} \min_x(f(x)) = & \text{real}(A_{\text{calcul}_m\text{odele}f_1} - A_{\text{mesure}f_1})^2 + \dots + \text{real}(A_{\text{calcul}_m\text{odele}f_{400}} - A_{\text{mesure}f_{400}})^2 \\ & + \text{imag}(A_{\text{calcul}_m\text{odele}f_1} - A_{\text{mesure}f_1})^2 + \dots + \text{imag}(A_{\text{calcul}_m\text{odele}f_{400}} - A_{\text{mesure}f_{400}})^2 \\ & + \text{real}(B_{\text{calcul}_m\text{odele}f_1} - B_{\text{mesure}f_1})^2 + \dots + \text{real}(B_{\text{calcul}_m\text{odele}f_{400}} - B_{\text{mesure}f_{400}})^2 \\ & + \text{imag}(B_{\text{calcul}_m\text{odele}f_1} - B_{\text{mesure}f_1})^2 + \dots + \text{imag}(B_{\text{calcul}_m\text{odele}f_{400}} - B_{\text{mesure}f_{400}})^2 \end{aligned} \quad (8.15)$$

Cet algorithme invoqué par la fonction `lsqnonlin` de Matlab[®] a été testé sur plusieurs capteurs de différentes tailles. Afin de faciliter la résolution de l'équation, la résistance r a été fixée à $229,75 \Omega/m$. Cette valeur provient d'une première optimisation qui inclut uniquement les paramètres r , l et c . Dans un deuxième temps, la variation de la résistance en fonction de la fréquence est intégrée (paramètre α). Les solutions de cette deuxième optimisation sont répertoriées dans le tableau 8.1.

taille capteur (m)	0,30	1 *	2 m long	2 m courbe	3 m long	3 m courbe
r (Ω/m)	229,75	229,75	229,75	229,75	229,75	229,75
α	0,014	0,002	0,037	0,037	0,173	0,023
l ($\mu H/m$)	28,3	10	24,8	24,1	26,3	27,0
c (nF)	0,23	0,26	0,26	0,25	0,26	0,25

*Modèle validé également jusqu'à 20 MHz d'après l'allure des courbes (paramètres $1/A$ et B). Les erreurs entre le modèle et la mesure n'ont cependant pas été quantifiées.

Tableau 8.1 – Résultats de la méthode des moindres carrés pour l'identification des paramètres r , α , l et c

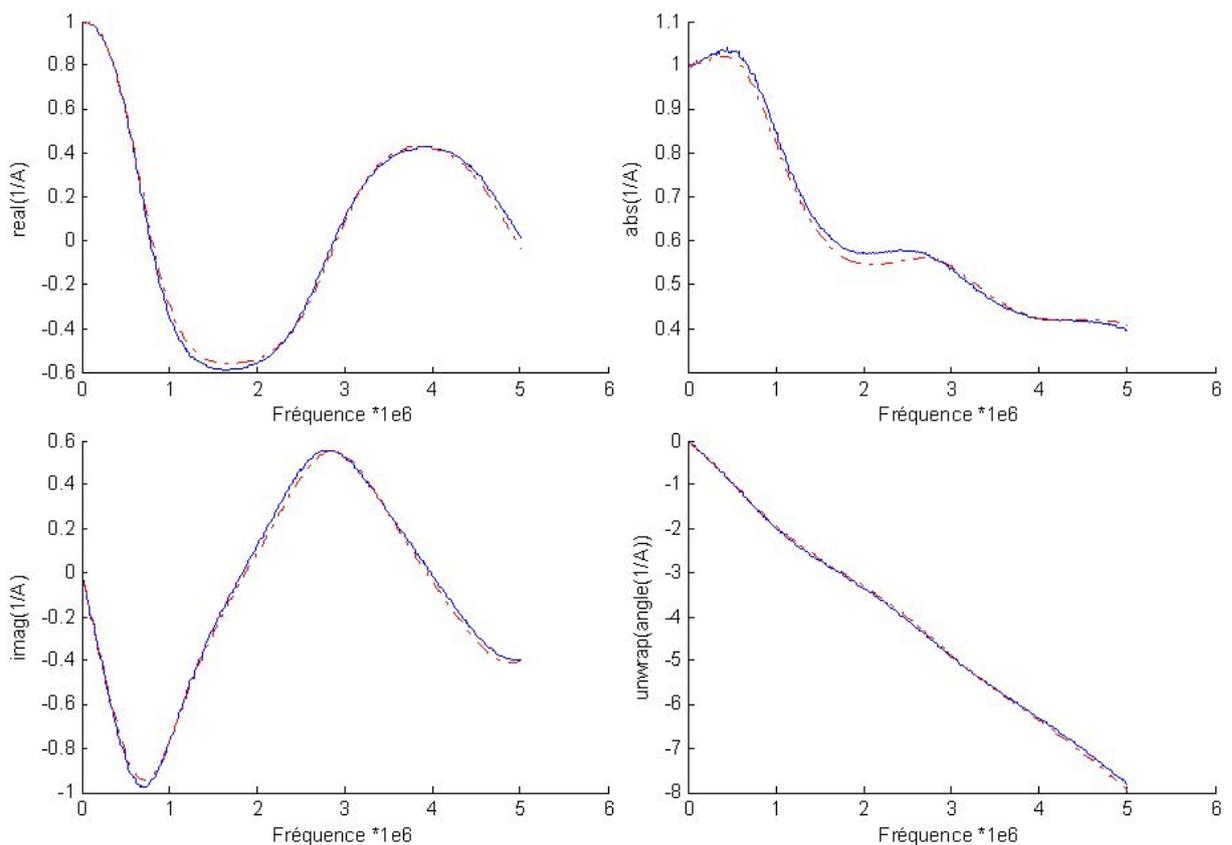


FIGURE 8.10 – Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre $(1/A)$ sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein, et la partie obtenue par le modèle est en rouge, trait discontinu.

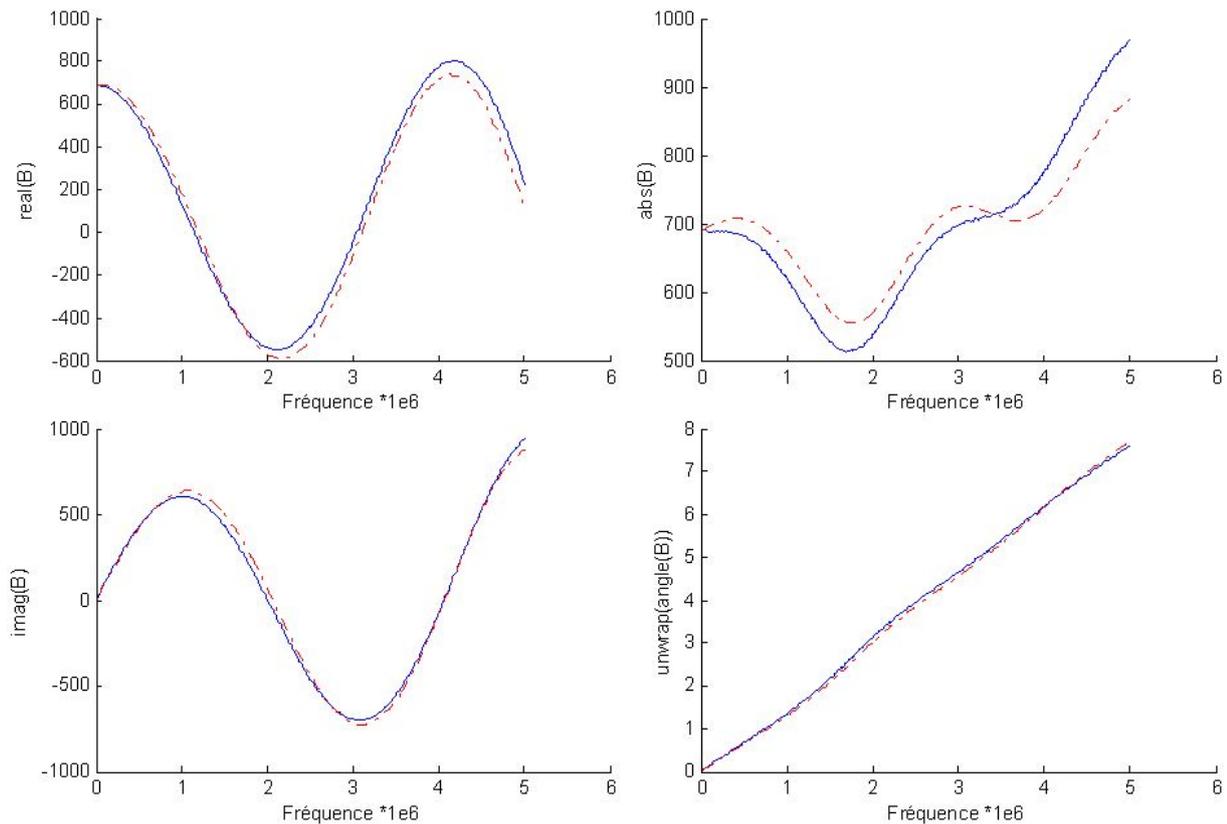


FIGURE 8.11 – Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre B sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein, et la partie obtenue par le modèle est en rouge, trait discontinue.

Ces résultats sont cohérents avec les valeurs trouvées par la modélisation à constantes localisées et mesurées physiquement. Ces résultats sont présentés graphiquement sur les figures 8.10 et 8.11. Les courbes provenant des mesures physiques obtenues par l'analyseur de réseau sont en bleu alors que les courbes tracées grâce au modèle caractérisé par l'optimisation sont en rouge. Le capteur se comporte comme une ligne de transmission à forte dispersion. Cette caractéristique est visible sur la figure 8.10 qui trace la fonction correspondant au paramètre $1/A$ en fonction de la fréquence, circuit ouvert ($I_2 = 0$). Cette fonction $1/A$ exprime l'atténuation de la ligne (fonction de transfert de V_B par rapport à V_A). Le paramètre B caractérise la ligne pour une sortie en court-circuit. Dans ce cas, V_B vaut 0 V. La capacité étant en court-circuit, la fonction $B(f)$ tend vers l'infini.

8.4.5 Le temps de propagation

Il a été mesuré à l'aide d'un générateur d'impulsion dont le temps de montée est de 4,8 ns. Les mesures du temps de propagation (du capteur uniquement) par rapport à la commande²

2. Temps nécessaire avant que le signal commence à changer d'état.

(t_d) et du temps de propagation à 50 % de l'extrusion totale du signal (t_p) ont été prises pour différentes longueurs du capteur. Ces mesures sont exposées dans le tableau 8.2. La vitesse de propagation dans les câbles coaxiaux réalisant les différentes connexions a bien évidemment été soustraite dans ce tableau. La figure 8.12 présente la tension d'entrée (en bleu) du générateur d'impulsion et la tension de sortie (en rouge). Quand le capteur est raccourci, des oscillations sont un peu plus marquées avant la stabilisation de sortie. La réponse impulsionnelle présente une réponse d'ordre deux et a un facteur d'amortissement proche de 0,7 (les oscillations sont de faibles amplitudes et peu nombreuses). Cependant, ce facteur diminue proportionnellement à la longueur du capteur. Le signal étant amorti, le système est donc stable.

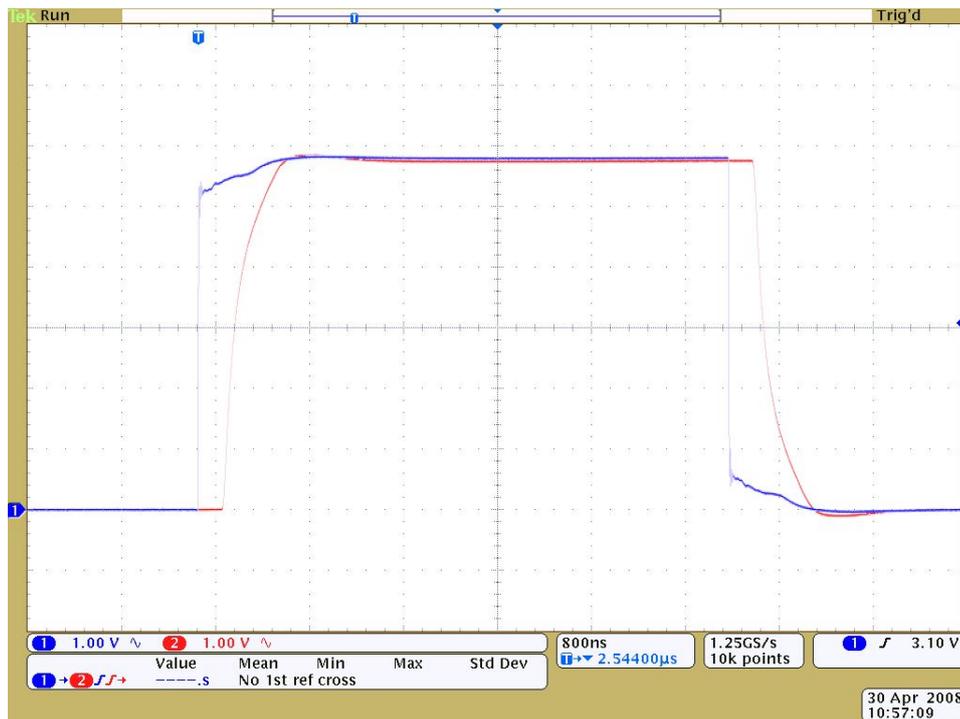


FIGURE 8.12 – Réponse impulsionnelle du capteur de 3 m.

temps \ longueur	0,30	1	2 m long	3 m long
t_d (ns)	22,4	50	125	205
t_p (ns)	30	64	175	288

Tableau 8.2 – Résultats des mesures des temps de délai et de propagation pour différentes tailles de capteurs.

Les temps, présentés dans le tableau 8.2, suivent une évolution linéaire par rapport à la longueur du capteur.

La phase traduit le décalage de l'onde par rapport à un signal donné. La vitesse de groupe est la dérivée de la phase. Elle caractérise la déformation de l'enveloppe de l'onde au cours de la propagation. Les graphes en bas à droite des figures 8.10 et 8.11 présentent l'angle du paramètre A et B. Cette angle décrit l'écart de phase entre deux signaux. Cette phase n'est pas

linéaire. C'est ce que montre la figure 8.13 qui représente la vitesse de groupe obtenue par le modèle (en haut) et par les mesures (en bas).

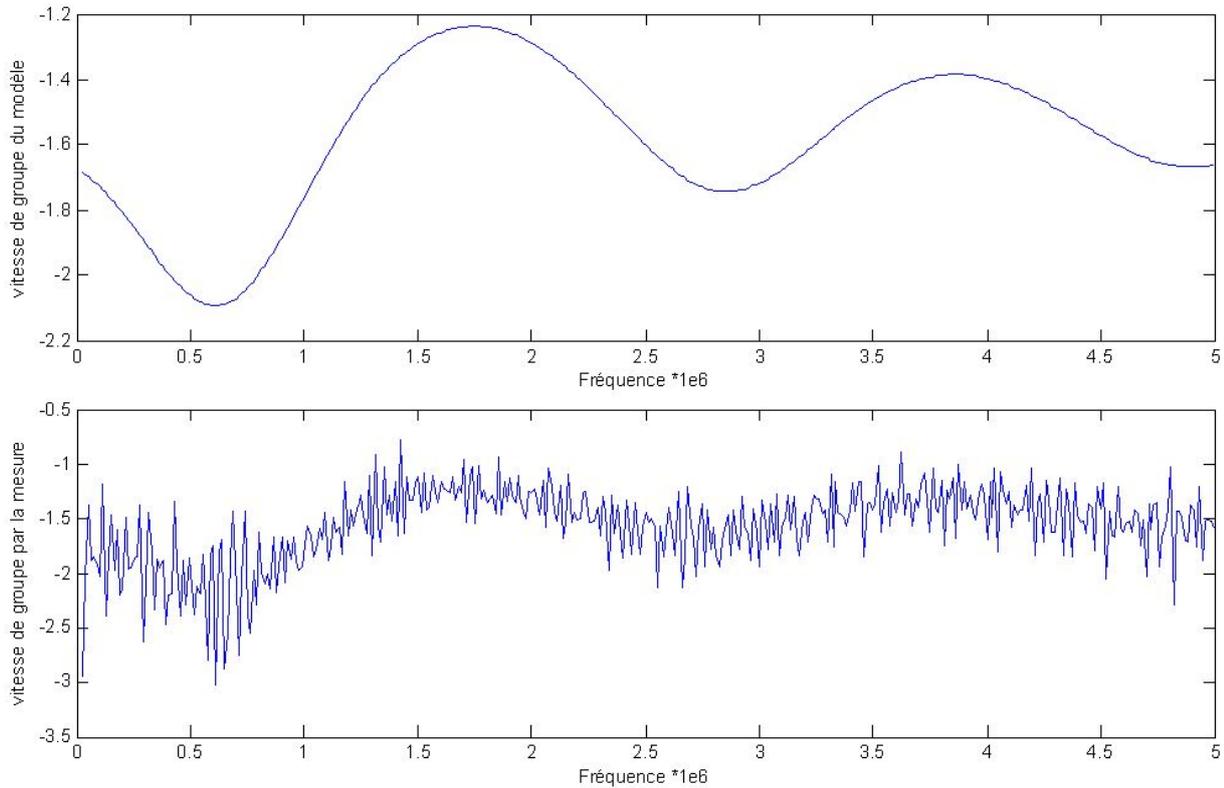


FIGURE 8.13 – Vitesse de groupe obtenue par le modèle (en haut) et par la dérivée de la mesure de phase (en bas).

Pour une ligne sans perte, la vitesse de groupe est constante. La figure 8.13 montre bien que cette vitesse n'est pas constante. Le système est alors appelé dispersif. Il est plus complexe qu'une simple ligne sans perte. Cette vitesse explique la différence entre le temps de propagation mesuré et le temps de propagation d'une ligne sans perte.

Au final, ce capteur se caractérise comme une ligne de transmission. Celle-ci a un comportement capacitif en basse fréquence. D'après ses paramètres calculés, l'utilisation de l'effet capacitif du capteur semble difficile à exploiter en raison de sa faible valeur. Cette ligne est dispersive et a une forte atténuation visible par l'étude du paramètre $(1/A(f))$.

8.4.6 Le modèle électrique équivalent

Dans le cadre de notre application, le capteur est sollicité à faible fréquence. Le produit $|\Gamma|$ par la longueur du capteur est proche de 0. Il est alors possible de présenter un modèle électrique équivalent au capteur en se fondant sur un développement limité du modèle précédent. Il se compose d'après la forme de la figure 8.14.

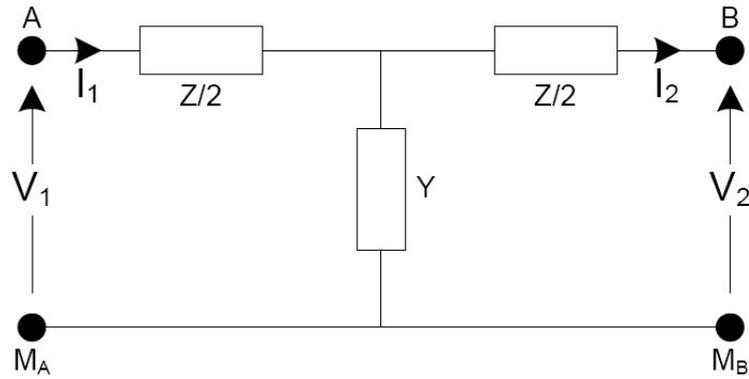


FIGURE 8.14 – Modèle électrique équivalent du capteur.

Ce schéma électrique, dit en T, est décrit par les paramètres ABCD d'après l'équation 8.16. La représentation suivant un modèle en Π donne un résultat équivalent. Dans chaque branche verticale de la cellule en Pi , le paramètre $Y/2$ est inséré. La branche horizontale contient le paramètre Z .

$$\begin{pmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{I}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} & \frac{Z(1+Y \cdot Z)}{4} \\ Y & 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{V}_2 \\ \underline{I}_2 \end{pmatrix} \quad (8.16)$$

Les paramètres ABCD de l'architecture électronique sont définis par des combinaisons des composants Z et Y (équation 8.16). Si l'architecture retenue est équivalente à notre modèle alors leurs paramètres ABCD sont égaux. Les paramètres ABCD du modèle peuvent être approchés par un développement limité à l'ordre 2 (équation 8.17).

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} & \frac{Z(1+Y \cdot Z)}{4} \\ Y & 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{(\Gamma \cdot L)^2}{2!} & Z_c \cdot (\Gamma \cdot L) \\ \frac{1}{Z_c} \cdot (\Gamma \cdot L) & 1 + \frac{(\Gamma \cdot L)^2}{2!} \end{bmatrix} \quad (8.17)$$

L'équation 8.17 permet d'identifier Z et Y .

$$\begin{cases} Z = r \cdot L \cdot (1 + \alpha \cdot \omega) + j \cdot l \cdot \omega \cdot L \\ Y = j \cdot c \cdot \omega \cdot L \end{cases} \quad (8.18)$$

8.4.7 Bilan

L'ensemble de ces résultats permet d'aboutir à un schéma électrique équivalent du capteur en basse fréquence. Ce circuit est conçu suivant une cellule en T comprenant une inductance, une capacité et une résistance variable suivant la fréquence. Cette structure est décrite au travers de la figure 8.15. Un signal évoluant en fonction de la fréquence se verra atténuer une seule fois

par cette cellule du deuxième ordre. En effet, un seul pic de résonance est présent vers 430 Hz. Pour cette raison, le modèle est limité à 1 MHz.

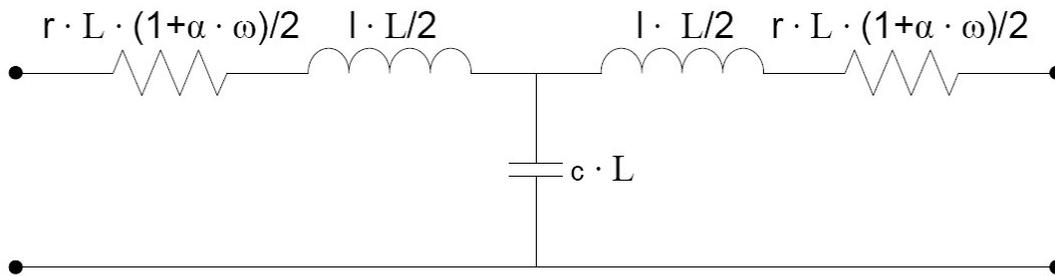


FIGURE 8.15 – Schéma électrique équivalent du capteur en basse fréquence.

Par ailleurs, la mesure de l'inductance ou de la capacité du capteur peut révéler une autre information que l'information de position. L'usage de ce modèle sert alors à valider en simulation une architecture électronique plus complexe par rapport à l'utilisation d'un pont de Wheatstone.

8.5 L'influence de la température

8.5.1 Présentation

Le capteur doit être conçu pour une utilisation en environnement extérieur. Cela signifie que le système doit supporter les variations climatiques. La température de service pour un enrobé bitumeux est comprise entre -20 °C et +60 °C [Brosseaud, 2003]. Cependant, en France, la température de la chaussée varie entre -10 °C et +40 °C. L'étude doit donc au moins comprendre cette plage de variation. Pour se prémunir de l'influence du soleil parfois ravageur, la plage choisie de variation de la température est de -15 °C à +80 °C.

Trois paramètres sont étudiés suivant un changement de température :

- la variation de la résistance du capteur seul ;
- la variation de la mesure acquise par la carte électronique ;
- la variation des deux éléments précédents simultanément.

Une étuve présente au sein du laboratoire est utilisée pour étudier l'influence de la température sur ces différentes parties dans la plage de température donnée préalablement.

8.5.2 L'influence de la température sur le capteur

La température influe sur la valeur de la résistance du fil suivant une loi linéaire régie par l'équation 8.19.

$$R_{T^{\circ}\text{C}} = R_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (1 + \alpha_{20^{\circ}\text{C}} \cdot (T^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C})) \quad (8.19)$$

avec $R_{T^{\circ}\text{C}}$ la résistance à la température T en degré Celsius, $R_{20^{\circ}\text{C}}$ la résistance à 20 °C et $\alpha_{20^{\circ}\text{C}}$ le coefficient d'extension thermique à 20 °C.

Le fil résistif utilisé (fil de 0,315 mm de diamètre en nickel-chrome - 80/20) a un coefficient de $12,5 \cdot 10^{-6}$. La valeur de la résistance à 20 °C est de 700 Ω . Une variation de 95 °C engendre une variation de résistance de 1,16 Ω . Cependant ce capteur résistif contient également un conducteur de retour susceptible lui aussi de varier suivant la température. Ces caractéristiques n'étant pas connues, il s'agira de considérer le comportement global du capteur suivant des variations de température et de déterminer si le fil résistif est le seul élément sensible à la température.

Au laboratoire, le capteur a été placé dans l'étuve suivant la gamme de température définie préalablement (-15 °C à +80 °C). Plusieurs mesures ont été relevées sur le capteur à des positions différentes : 0,50 m, 1 m, 1,50 m, 2 m, 2,50 m et 3 m. Pour introduire le capteur dans l'étuve, il a été enroulé suivant la forme d'une spirale. Le capteur de 3 m se confine ainsi dans un cercle dont le diamètre maximum est de 35 cm. La linéarité du capteur a été vérifiée avant et après l'avoir enroulé. Aucun changement de comportement n'a été relevé. Les mesures restent identiques. La forme du capteur n'a pas d'influence sur les mesures acquises. Entre chaque changement de température, un temps de trente minutes au minimum est respecté pour tenir compte de l'inertie thermique.

Le changement de température s'effectue par palier de 10 °C au maximum. Le capteur met dix à quinze minutes pour atteindre la température désignée et donner une mesure stable.

Le graphique 8.16 montre l'évolution des mesures de résistance relevées avec l'ohmmètre utilisé auparavant en fonction de la température lue sur les différentes positions énoncées avant. Globalement la résistance d'une portion du capteur demeure constante quelle que soit la température de ce dernier. En revanche, cette résistance augmente proportionnellement à la longueur considérée.

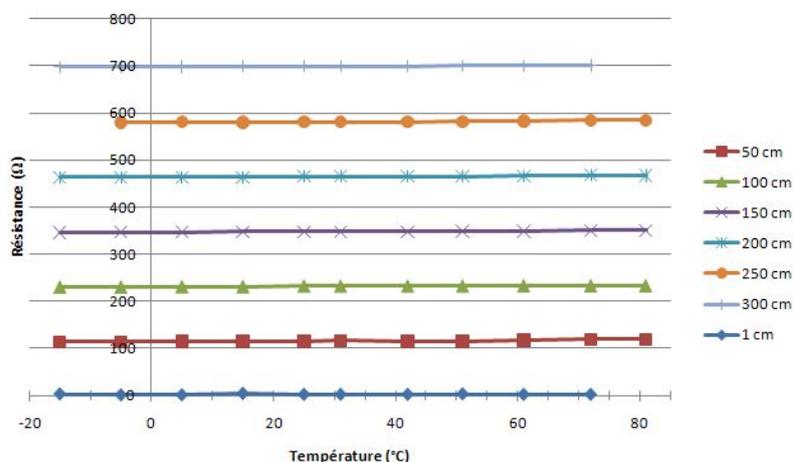


FIGURE 8.16 – Evolution de la résistance en fonction de la température pour différentes positions.

La résistance linéique de ce capteur est indépendante de sa longueur. Ce résultat est mis en avant par la figure 8.17. Les acquisitions des résistances aux différents points de mesure ont été ramenées au centimètre. Les mesures obtenues à 50 cm s'écarte au maximum de 0,037 Ω de la droite de régression linéaire. Les autres mesures ont, elles, un écart maximum de 0,0045 Ω . Le coefficient d'extension thermique est de $4 \cdot 10^{-4}$, soit environ 30 fois plus que le coefficient d'extension thermique du fil résistif seul (équation 8.19). En retirant les mesures obtenues à 50 cm, le coefficient d'extension thermique reste encore environ 16 fois plus grand que celui du fil résistif. Cet écart est dû à des erreurs de mesure mais également au coefficient d'extension thermique de la peinture résistive.

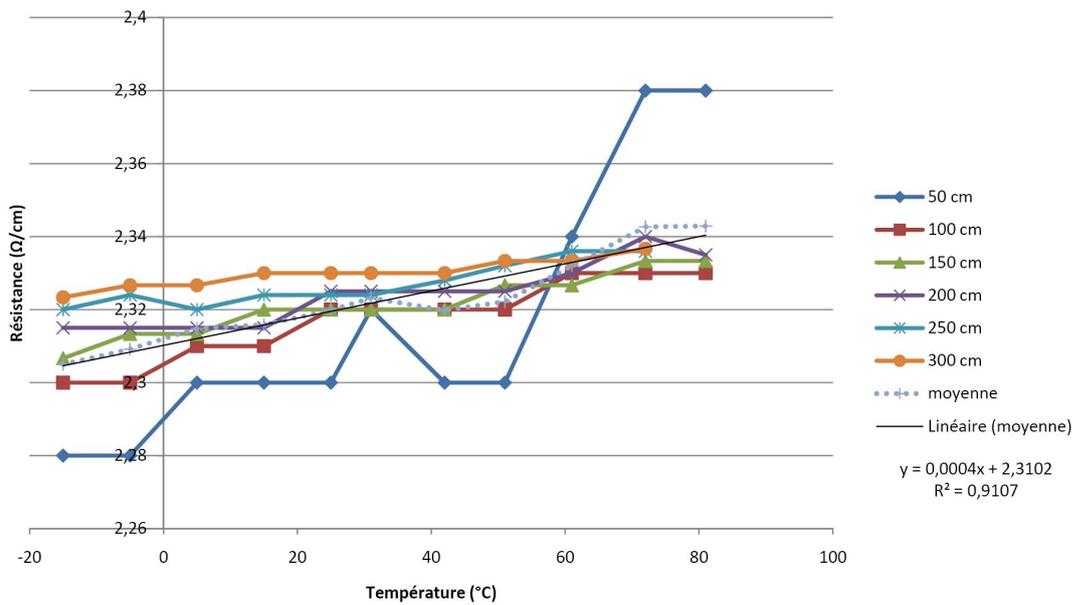


FIGURE 8.17 – Evolution de la résistance linéique en fonction de la température pour différentes positions.

Sur la figure 8.18, la valeur de référence de la résistance à 25 $^{\circ}C$ a été prise en compte pour étudier l'influence de la température sur la résistance. Sur l'ensemble des mesures prises dans les différentes positions, la régression linéaire des moyennes des acquisitions pour chaque position permet d'établir une relation. Celle-ci donne la variation de la résistance du capteur en fonction de la température à moins de 2 ohms près, soit moins de 7 mm (équation sur la figure 8.18). En connaissant la température du capteur, cette équation garantit une précision centimétrique à condition de connaître sa température dans la gamme de températures donnée.

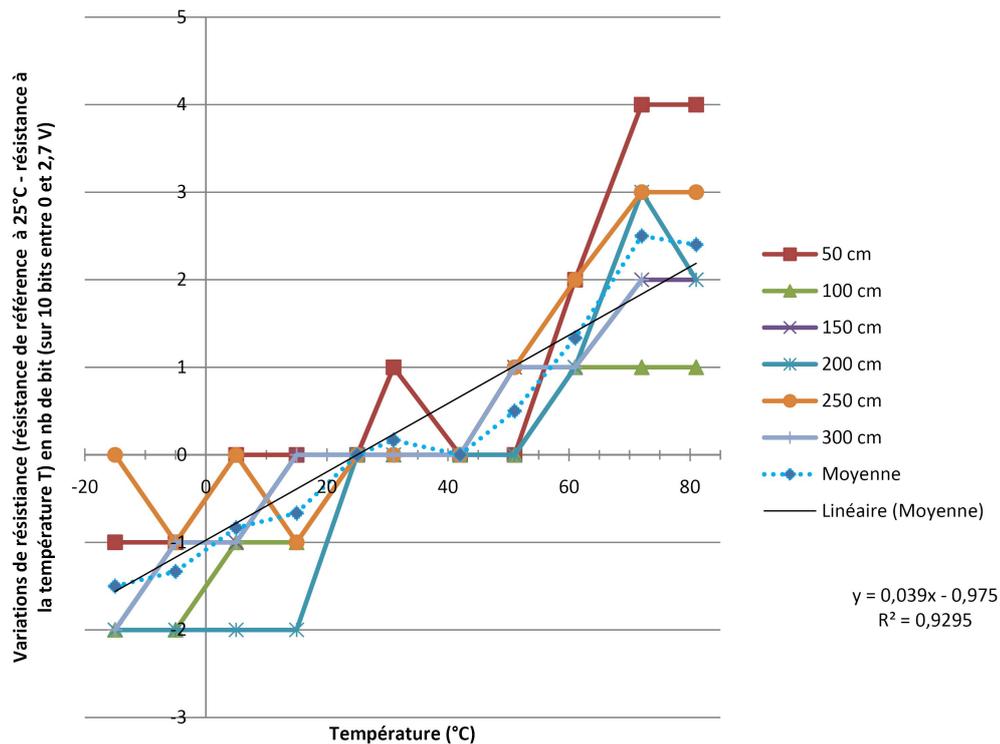


FIGURE 8.18 – Variations de la résistance par rapport à la résistance de référence prise à 25 °C en fonction de la température du capteur seul et pour différentes positions.

Ces tests confirment le fonctionnement du capteur dans une plage de température comprise entre -15 °C et +80 °C. Il est faiblement sensible à la température. Cette sensibilité provient à la fois du fil résistif (contribution à cette variation pour un quart environ) mais surtout du conducteur de retour constitué par la peinture. Selon la température, le tube contenant la tige filetée sur laquelle la peinture est fixée présente une rigidité variable. A température élevée, il se ramollit et, avec le froid, se rigidifie. Quelques mesures ont été prises à titre indicatif à 120 °C. Elles confirment son fonctionnement.

8.5.3 L'influence de la température sur le système d'acquisition seul

L'électronique d'acquisition a ensuite été insérée seule dans l'étuve. Le réseau CAN permet de recevoir directement les mesures sur un ordinateur en dehors de l'étuve. Cette expérience permet de tester le comportement de l'électronique aux variations de température et d'observer sa dérive en température. A chaque variation, la mesure de la tension de référence maximale du convertisseur est enregistrée (une tension de 2,7 V assurée par un diode Zener). Cette tension est prise selon deux approches différentes : un oscilloscope et la carte électronique. La carte électronique effectue une conversion analogique-numérique sur 10 bits entre la tension d'alimentation (5 V en sortie du régulateur) et la masse puis transmet cette valeur à l'ordinateur. Les variations entre la mesure de référence à 25 °C et les mesures obtenues en fonction de la température sont représentées sur le graphique 8.19. Le microcontrôleur utilisé fonctionne, d'après sa documentation technique, entre -40 °C et +125 °C.

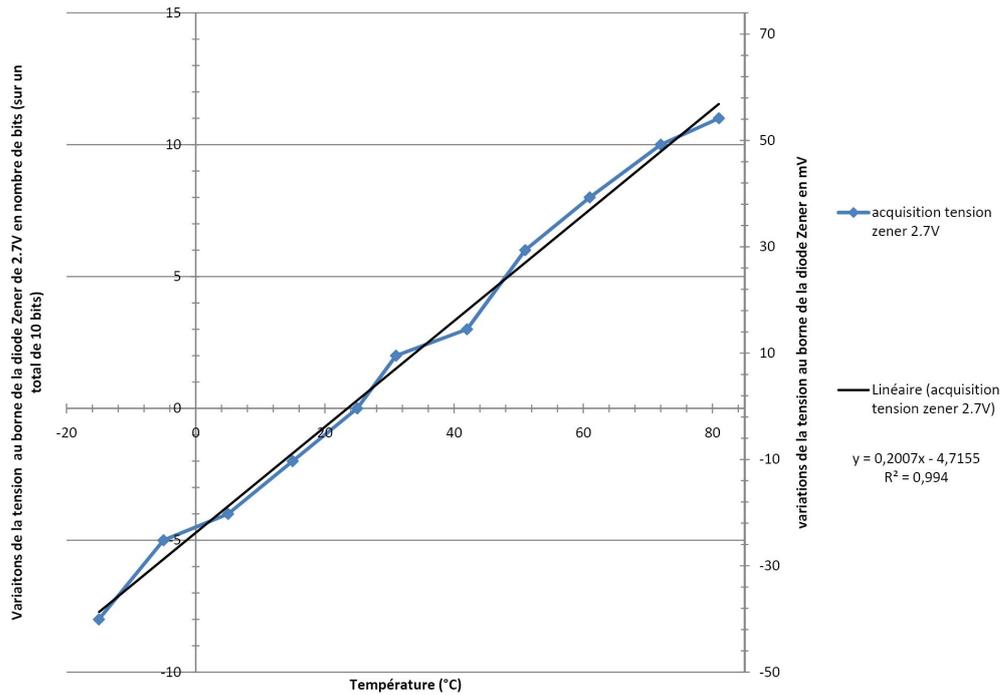


FIGURE 8.19 – Variations entre la tension Zener acquise par le CAN 10 bits à 25 °C et celles prises à différentes températures.

La mesure à l’oscilloscope est prise à la fois sur la tension de sortie du régulateur gérant l’ensemble de l’alimentation de la carte et sur la tension aux bornes de la diode Zener. Cette évolution est représentée sur le graphique 8.20.

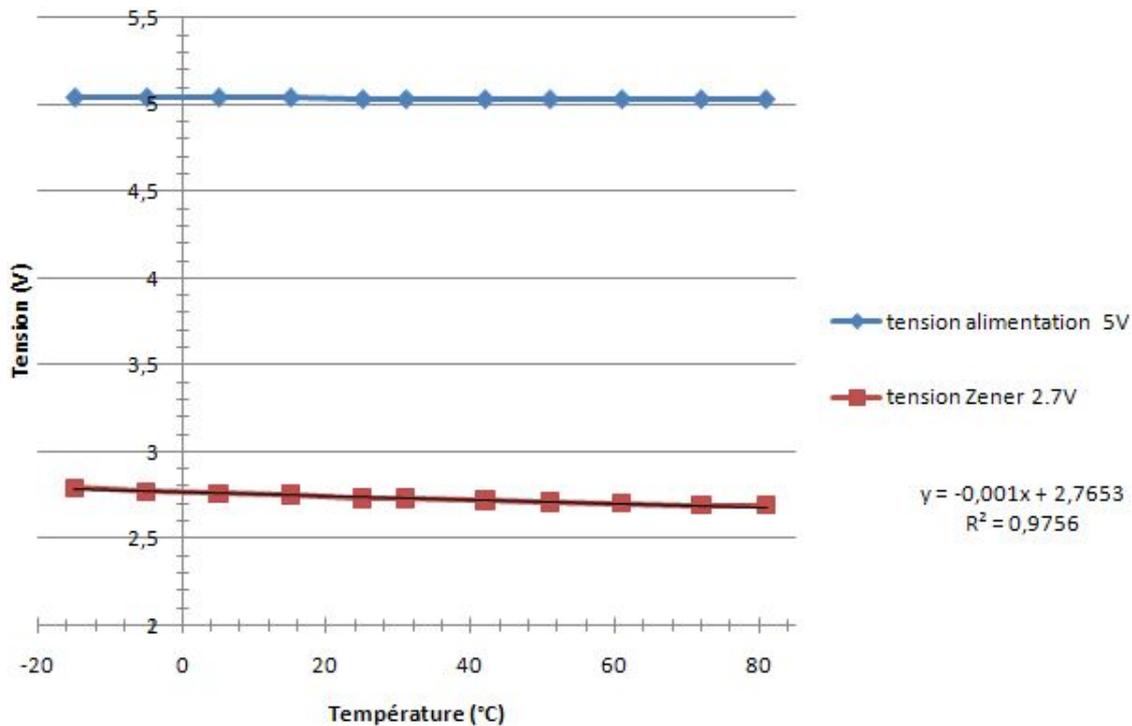


FIGURE 8.20 – Evolution des tensions d’alimentation de la carte en sortie du régulateur et de la tension au borne de la diode Zener en fonction de la température, l’ensemble est mesuré à l’oscilloscope numérique.

Sur la gamme de températures testées (-15 °C à 81 °C), la tension du régulateur varie de 10 mV tandis que la tension aux bornes de la diode Zener subit une variation de 83 mV d'après l'électronique d'acquisition et de 93 mV d'après l'oscilloscope. Pour une température donnée, quelle que soit la valeur de la résistance, la carte électronique fournit le même décalage. La droite de régression de la figure 8.19, page 110, permet de connaître le décalage de la mesure due au changement de la température et donc de repositionner les mesures à 25 °C afin d'utiliser par la suite le modèle linéaire du capteur. Cette évolution peut être limitée par l'intégration, dans une prochaine version de la carte électronique, d'un circuit intégré spécifique afin de fournir une tension de référence plus stable en température.

La carte électronique, placée dans l'étuve à la température T, met six minutes à se stabiliser.

8.5.4 L'influence simultanée de la température sur l'électronique et le capteur

Pour compléter cette étude, l'électronique d'acquisition, accompagnée du capteur, a été insérée dans l'étuve. Cette nouvelle expérience sert à observer l'influence de la température simultanément sur la carte électronique et le capteur (figure 8.21).

A chaque changement de température, les mesures de tension en sortie du convertisseur sont récupérées aux mêmes points que ceux utilisés dans l'expérience présentant l'influence de la température sur le capteur seul. Les résultats de ces mesures sont reproduites sur le graphe 8.22. Celui-ci montre les variations acquises par le CAN de la carte électronique en fonction de la température. La variation est nulle à 25 °C. L'acquisition à cette température constitue la mesure de référence. Des relevés à plusieurs positions sont présentés sur ce graphe.

D'après la régression linéaire représentée sur la figure 8.22, la température ne doit pas varier de plus de 34,8 °C pour garder un nombre de bits inférieur ou égal à 2. Ces deux bits assurent une précision inférieure à 1 cm sur la position relevée le long du capteur. Pour des températures basses ou élevées, ce graphique montre également que la résolution de système d'acquisition ne peut satisfaire une résolution centimétrique. Cependant elle reste dans l'ordre de grandeur du centimètre.



FIGURE 8.21 – Présentation de la manipulation : le capteur et son électronique sont dans l'étuve.

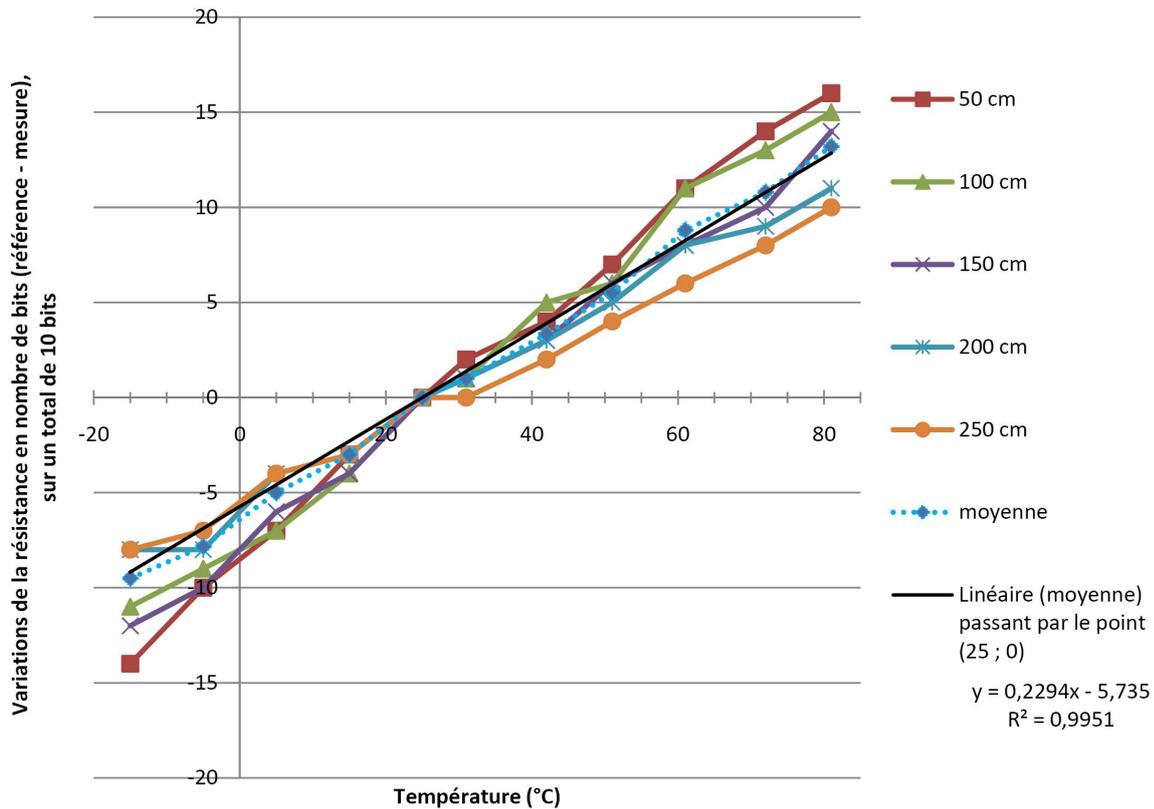


FIGURE 8.22 – Variations en nombre de bits de la résistance du capteur entre la référence à 25 °C et les acquisitions à différentes températures. Ces variations sont mesurées par la carte électronique placée avec le capteur dans une étuve.

L'étude de l'influence de la température sur l'électronique a mis en évidence la faible variation de la tension aux bornes du régulateur (environ 1 bit sur la plage de température). En revanche, la tension aux bornes de la diode Zener - qui sert de référence comme tension maximale pour la conversion analogique numérique - fluctue de manière significative (20 bits sur la plage des mesures concernées). Un réajustement fiable est possible en effectuant une régression linéaire proposée sur la figure 8.19. Cependant, la comparaison entre les figures 8.18, 8.19 et la figure 8.22 permet de définir une règle simple reliant la variation individuelle du capteur et de l'électronique à celle de ces deux éléments réunis. Cette règle est représentée sur la figure 8.23. Le modèle général se caractérise par la somme des deux modèles séparés. Comme le montre cette figure, ces deux modèles sont équivalents.

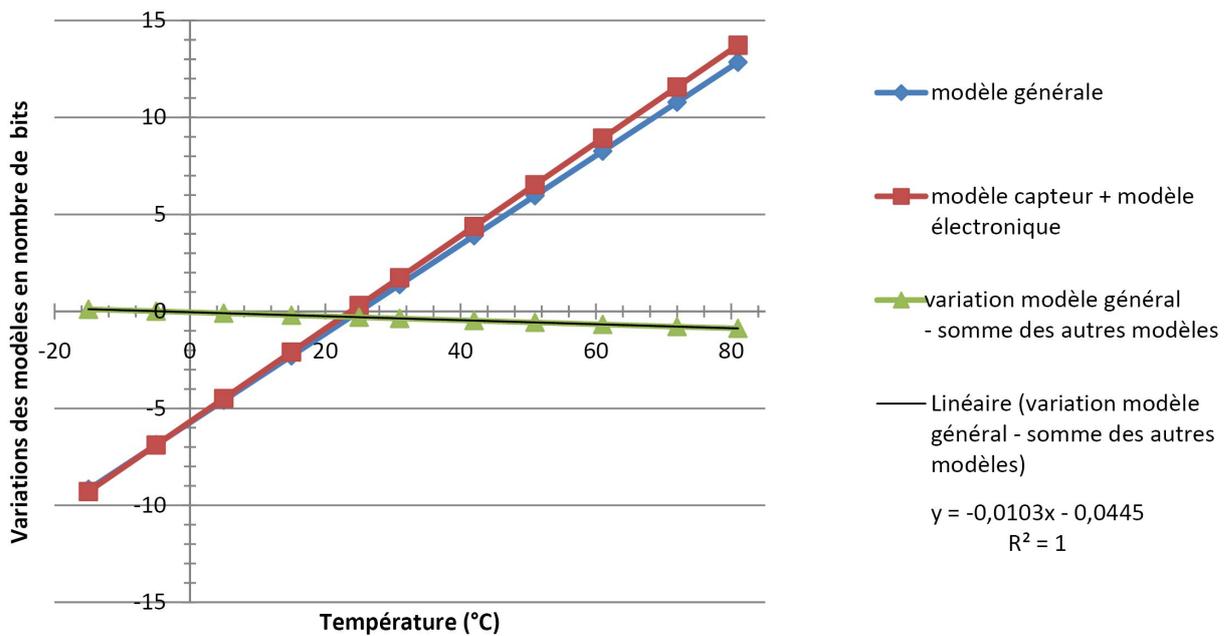


FIGURE 8.23 – Représentation des variations du nombre de bits du modèle général et du modèle - capteur et électronique - en fonction de la température. L'erreur commise par l'usage du modèle général par rapport au modèle - capteur et électronique - est également tracée (différence entre les deux modèles).

Pour être plus précis, le système doit posséder deux capteurs de température. Le premier se situe sur le capteur, le second sur la carte électronique. En effet, le capteur ne subit pas nécessairement les mêmes contraintes thermiques. La réalité fait que le capteur de température sur la carte est déjà opérationnel : la mesure de la diode Zener renseigne sur la température à 5 °C près (variation d'un quantum).

A titre d'information, une diminution brutale de température (de +80 °C à +5 °C) a été opérée (limitée par les possibilités de l'étuve) en huit minutes. Des mesures ont été réalisées immédiatement. Les valeurs correspondent aux mesures à 15 °C. Cette expérience a permis de constater que la sensibilité du capteur à la température n'était pas immédiate. Ce temps est difficile à chiffrer dans la mesure où le capteur n'a pas subi brutalement un changement de température. Néanmoins, d'après les observations décrites, le capteur met moins de dix minutes pour s'acclimater à une variation brutale de 75 °C.

Le dernier test à consister à examiner le comportement de la carte en milieu humide, lorsque la température varie. En effet, toutes les cartes électroniques ont été tropicalisées, c'est-à-dire enduites d'un vernis les protégeant d'une atmosphère humide. Pour cela, l'électronique a été abondamment aspergée d'eau. La carte venait d'être testée à 81 °C. L'acquisition des mesures du capteur était conforme à ce qui était attendu. Ensuite la température a chuté jusqu'à -15 °C. La carte a de nouveau été arrosée. Des valeurs non attendues sont apparues. Par exemple la carte indique un deuxième capteur présent alors qu'un seul est connecté. Néanmoins la communication est préservée. Une remise à zéro de la carte est parfois nécessaire pour rétablir cette communication. Revenue à la température ambiante et séchée, la carte est de nouveau

opérationnelle. Elle affiche des résultats cohérents mais légèrement inférieurs à ceux prévus préalablement.

8.6 Le temps de réponse mécanique

Dans les précédents tests, l'excitation du capteur s'effectuait en utilisant un objet posé sur celui-ci. Cette mesure statique a été validée. Cependant il reste à vérifier la bonne réaction du capteur à une sollicitation dynamique. Cette réponse est donnée en étudiant son temps de réponse mécanique.

Une sollicitation impulsionnelle va être appliquée sur le capteur. Un marteau de faible poids (100 g environ) frappe le capteur. Comme il ne s'agit pas d'un marteau de choc, l'excitation n'est pas mesurée. Cependant la réponse est enregistrée à l'oscilloscope (figure 8.24). Pour ce test, le capteur est placé dans un circuit où une alimentation de cinq volts, une résistance de 1 k Ω et le capteur sont en série. L'oscilloscope mesure la tension aux bornes du capteur. L'impact a lieu, dans le cas présent, à 60 cm par rapport à la position 0 du capteur. Cette sollicitation provoque une réduction de sa résistance (700 Ω vers 140 Ω).

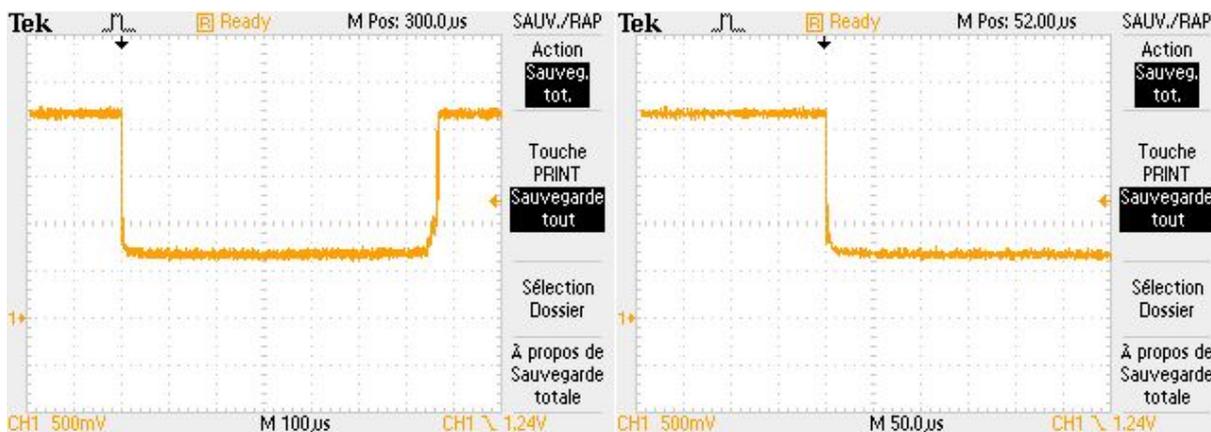


FIGURE 8.24 – Temps de réponse mécanique du capteur suite à une impulsion : à gauche la réponse de l'impulsion, et, à droite, un zoom sur la première partie de la réponse à l'impulsion.

Cette réponse est d'ordre un. En 10 μs , la réponse est stable. Cette transition rapide indique que ce capteur est mécaniquement apte à détecter le passage d'un véhicule. Si l'impact avec le véhicule est suffisamment franc, alors le signal attendu à la forme d'un créneau à l'image de la partie gauche de la figure 8.24.

8.7 Bilan du capteur résistif

Ce capteur novateur permet d'acquérir une information de position d'un objet de nature variée ayant un contact avec celui-ci. Son emplacement est proportionnel à la mesure d'une résistance. Sa forme et sa longueur peuvent varier et ainsi présenter des courbures.

La construction de ce capteur s'effectue en trois étapes distinctes. La première consiste à bobiner le fil résistif dans le filetage de la tige filetée. Cette opération a montré une très bonne répétabilité de la construction. La deuxième étape comporte l'application de la peinture à l'intérieur du tube conducteur. Elle s'effectue par coulage ce qui provoque des écarts sur la mesure du conducteur de retour. En général cette résistance électrique vaut 8Ω à $\pm 5 \Omega$ pour une longueur de tube de 4,5 m. Elle peut cependant s'élever jusqu'à 100Ω en utilisant le même procédé de fabrication. Le troisième réside à insérer la tige dans le tube et à connecter électriquement l'ensemble.

Les tests effectués révèlent la précision du capteur résistif. Elle approche le centimètre. 95 % des mesures effectuées en laboratoire donne une position précise à $\pm 1,2$ cm à 25°C . Pour cela, le capteur résistif est connecté à son système d'acquisition dédié. La valeur numérique reçue est utilisée dans le modèle de régression linéaire donné par l'équation 8.1 afin d'obtenir la position sur le capteur. Elle reste bornée à $\pm 2,5$ cm. Si la température du capteur varie de -15°C à $+80^\circ\text{C}$, l'erreur de mesure peut être corrigée en utilisant l'équation de la figure 8.18. Si la température de la carte d'acquisition et du capteur varie de $\pm 17,4^\circ\text{C}$, une erreur maximale de mesure de 1 cm apparaît. L'équation donnée sur la figure 8.22 assure une erreur de mesure inférieure à 3 cm sur la plage des températures comprises entre -15°C et $+80^\circ\text{C}$.

Au final, il est possible d'écrire une relation liant la résistance, la température et la position. Pour un premier modèle, considérer uniquement la température de la carte électronique du capteur est suffisant. L'utilisation de l'équation 8.1 et de l'équation de la figure 8.18 permet d'aboutir à :

$$ResistanceCapteur_{[\Omega]} = 2,325 \cdot position_{[cm]} - 0,243 \cdot (TemperatureCarte_{[^\circ\text{C}]} - 22,078) \quad (8.20)$$

L'équation 8.21 est plus facile à utiliser dans notre cas. En effet, elle relie directement la mesure de la position en centimètre à la mesure en sortie du CAN et de la température de la carte électronique en degré Celsius.

$$position_{[cm]} = -0,456 \cdot mesureCAN + 0,105 \cdot TemperatureCarte_{[^\circ\text{C}]} + 422,3 \quad (8.21)$$

Une approche plus poussée consisterait à inclure séparément dans ce modèle la variation due à un changement de température sur le capteur et celle due à un changement de température

sur la carte électronique. Cependant, la part de l'influence de la température sur le capteur représente environ 14 % de l'ensemble des variations en température.

La résolution du capteur conçu dépend principalement de la résolution du système électronique d'acquisition. En effet, il est construit sous la forme d'un ensemble de spires. Chaque spire étant séparée de 0,8 mm dans le cas présent, il est théoriquement possible d'atteindre cette précision pour ce capteur.

Le modèle électrique du capteur permet de simuler un schéma électrique complet pour des signaux en basse fréquence (fréquence inférieure à 1 MHz). Les cartes d'acquisition effectuent une mesure en courant continu. Des mesures utilisant un signal alternatif peuvent améliorer la précision de la mesure.

Ce capteur a été testé à la résistance aux décharges électrostatiques, les décharges allant jusqu'à 16,5 kV dans l'air puis jusqu'à 9 kV au contact du capteur et des câbles de transmission. L'appareil utilisé est le NSG 435 de chez Schaffner. Le système a résisté à l'ensemble des perturbations.

Ces perspectives intéressantes nous ont incités à effectuer une demande de dépôt de brevet en octobre 2007. Sa validation a été acquise en avril 2009. Ce brevet concerne sa mise en forme ainsi que sa mise en oeuvre [[Plainchault et Aubin, 2009](#)].

Les tests en laboratoire ont pu déterminer sa détérioration lorsqu'il est directement posé sur le sol. L'altération de la peinture présente à l'intérieur du tube conducteur se produit après quelque 300 passages d'essieux de voitures sur la même zone. L'installation de ce capteur dans la chaussée de la route nécessite l'emploi d'un matériau de conditionnement qui limite les contraintes exercées.

Chapitre III

Expérimentation sur la route départementale 961

9.

Présentation

9.1 Objectifs

Préalablement au programme Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires (SARI), la direction des routes et des transports du Conseil Général du Maine-et-Loire (CG49) a identifié le site de « Marans » sur la route départementale D 961 comme un site où a eu lieu un nombre élevé d'accidents (notamment des accidents ne donnant pas suite à un procès verbal) et pour lesquels aucune cause tangible n'a permis d'expliquer leur fréquence. Entre 1998 et 2000, quatre accidents ayant fait l'objet d'un procès verbal ont été relevés et restent mal expliqués. Dans la plupart des cas, il s'agit d'accidents n'impliquant qu'un seul véhicule. Ce site possède la particularité d'être en ligne droite avec un sommet de côte, une situation que l'on rencontre fréquemment sur le réseau routier du département de Maine-et-Loire et pour laquelle de nombreux accidents non expliqués sont à déplorer. Cette topologie de route n'est que très peu étudiée bien que beaucoup de départements comme celui du Maine-et-Loire (49) avec ses 4 500 km de routes départementales présentent cette configuration.

Ce tronçon se situe à 40 km au nord ouest d'Angers (49). Environ 2 000 véhicules par voie emprunte chaque jour cette départementale. Elle présente un taux de circulation de poids lourds légèrement inférieur à la moyenne nationale (cf. paragraphe 1.3 page 11). Le besoin d'observer les véhicules circulant sur ce sommet de côte a nécessité l'installer de capteurs [Aubin *et al.*, 2008]. La convergence entre ce besoin et celui d'effectuer des tests en grandeurs réelles a permis les déploiements des solutions évoquées précédemment.

9.2 Le conditionnement et l'intégration des capteurs dans la chaussée

Le principe de conditionnement de ces capteurs a été inspiré des capteurs non embarqués qui s'installent dans la chaussée de la route tels que les boucles électromagnétiques ou les capteurs piezo-électriques... [Fillastre, 2006].

9.2.1 Le conditionnement des capteurs optiques

Comme présenté dans le paragraphe 7.4.4 page 72, les quatre fibres constituant un capteur optique sont nues. Elles sont donc fragiles et difficilement manipulables. Pour faciliter leur installation, elles sont confinées dans un tube PVC, profilé en U (3 de la figure 9.1). Sa dimension est de 18 mm de largeur interne, 20 mm de largeur externe, et 10 mm de hauteur. De la résine spéciale¹, 2 de la figure 9.1), conçue pour protéger les câbles et les fibres optiques, est coulée dans ce profilé sur une hauteur de 5 mm. Cette résine est considérée comme souple. Après séchage, la première fibre optique est positionnée, puis la deuxième est placée, décalée de 45 mm comme énoncé dans le paragraphe précédent et ainsi de suite jusqu'à la quatrième. La partie pigtail, zone constituée dans notre cas d'une fibre optique comme la zone reliant le capteur et le connecteur, est insérée dans un tube souple renforcé pour protéger la partie restante des fibres optiques. Ce tube est fixé au profilé en PVC par l'intermédiaire d'un collier. Une nouvelle couche de résine est ensuite coulée afin de protéger la zone sensible et de limiter les déformations excessives. L'ensemble est ainsi aisément transportable et prêt à être positionné dans la chaussée de la route.

Deux capteurs optiques ont été installés. Au final, les fibres se situent dans la chaussée à une profondeur voisine de 0,8 cm.

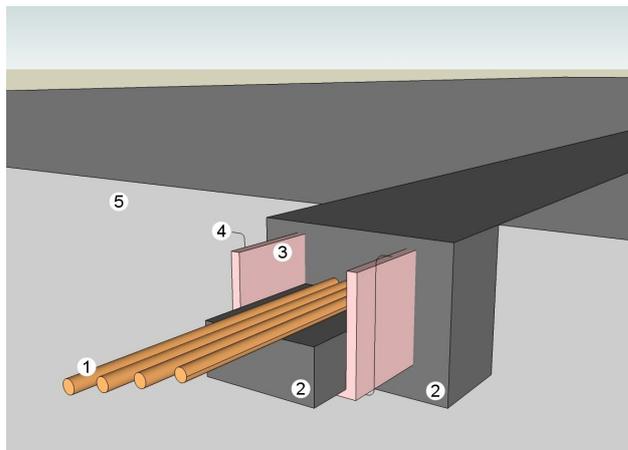


FIGURE 9.1 – Schéma du capteur à fibres optiques enfoui dans la chaussée de la route. 1 - fibres optiques (grossies cent fois), 2 - résine, 3 - profilé PVC en forme de U, 4 - support du capteur pour l'installation à la hauteur désirée sur la route, 5 - bitume.

1. Cette résine a été présentée précédemment : Resimast 460 boucle de la société Résipoly.

9.2.2 Le conditionnement des capteurs résistifs

Les capteurs résistifs présentés dans le paragraphe 8 page 85 ont été directement positionnés dans la chaussée. Cependant pour résister au passage des véhicules, une résine (identique à celle employée pour les fibres optiques) a été appliquée pour limiter les déformations du capteur. Pour assurer le contact entre le fil résistif et la peinture, le capteur dépasse de 3 à 4 mm au-dessus de la surface de chaussée. Dans le cas contraire, la résine limite la déformation du tube. Or, pour que le contact se produise, la paroi interne du tube (3 de la figure 8.1 page 86) doit se déformer de 1,7 mm, espace vertical entre le fil résistif et la paroi interne conductrice au dessus de ce fil. Des tests sur des plateformes mobiles ont permis de valider sa bonne déformation. 29 dispositifs de cette nature ont été installés.

9.2.3 L'installation des capteurs dans la chaussée

Ils ont préalablement été élaborés au laboratoire de l'ESEO afin d'en faciliter la pose sur la route départementale 961 dans le sens Marans vers Segré (sud vers le nord). Le trait de scie dans la chaussée a pour section 3 cm de large et 2 cm de profondeur. La longueur de la saignée doit être légèrement supérieure à la longueur du capteur (figure E.3). Lors de l'excavation, la profondeur de la saignée n'est pas régulière. Le capteur peut difficilement reposer au fond de la saignée. Deux solutions sont alors envisagées : soit une résine est déposée dans le fond et un système nivelle la profondeur adéquate en enlevant le surplus, soit le capteur est suspendu dans la position désirée. Après le placement du capteur dans la saignée, une résine spéciale et considérée comme souple, identique à celle utilisée dans la construction du capteur à fibres optiques, est versée afin de le noyer dans l'enrobé. La première solution n'est pas très pratique, car il faut maîtriser parallèlement le séchage de la résine, la pente de la route et son dévers. La deuxième solution permet de préparer et de positionner facilement le capteur en amont puis de le noyer dans la résine. Pour suspendre les capteurs, des supports en U ont été fabriqués (3 sur la figure 9.1 relative au capteur à fibres optiques et en annexe E sur la figure E.2). Cependant, l'orniérage présent de plus d'un centimètre par endroit et la granulosité de la route ne facilitent pas le réglage de la profondeur de pose avec une grande précision. Un exemple d'installation est donné figure 9.2.



FIGURE 9.2 – Exemple d'installation d'un capteur résistif dans la chaussée.

Cette technique de pose fait suite à des premiers tests sur site et aux recommandations données par le Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE) Normandie Centre pour la pose des capteurs piezo-électriques.

9.3 Schéma général des expérimentations

Le schéma de la figure 9.3 présente une partie de la route avec un capteur optique à réseaux de Bragg et un capteur résistif.

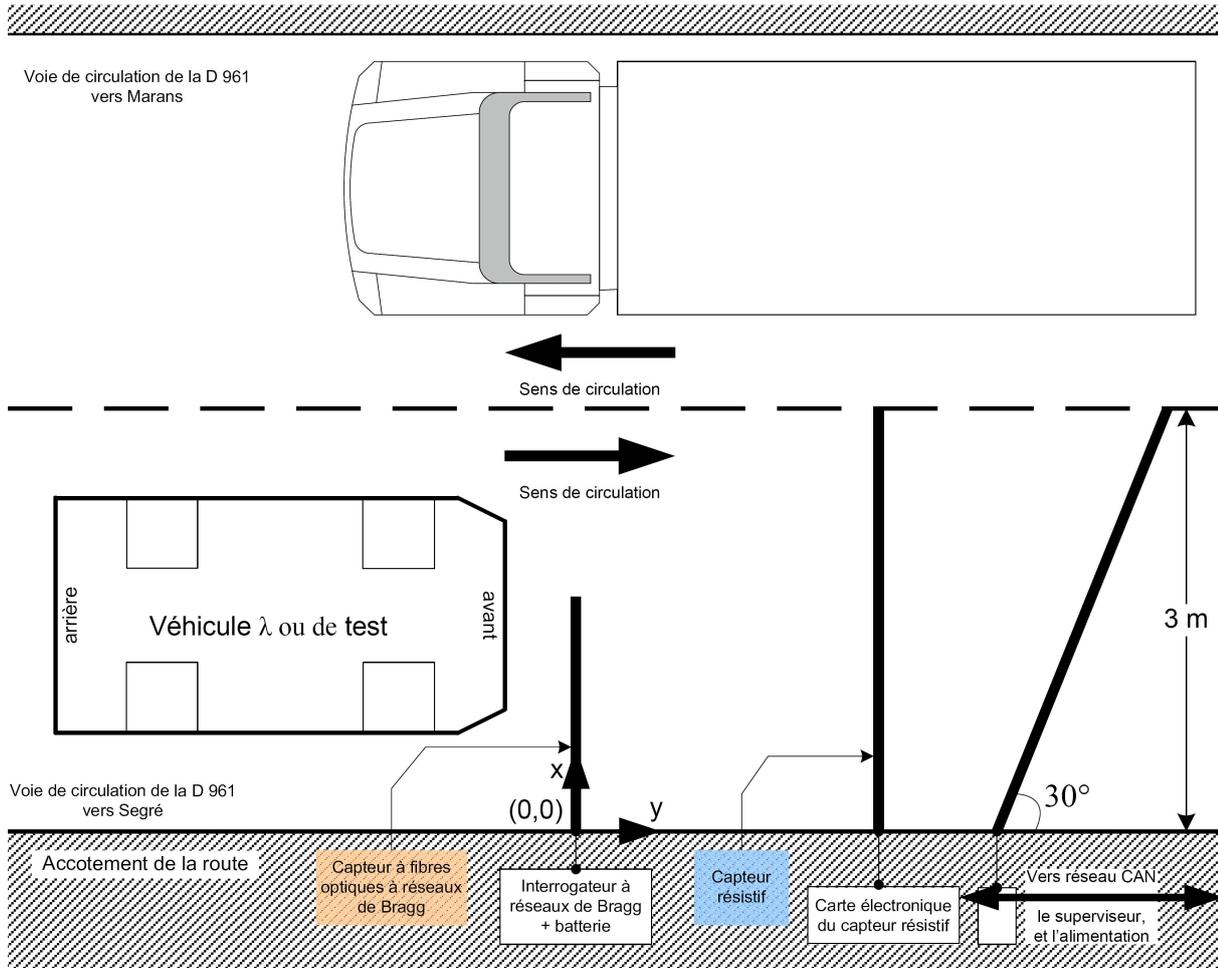


FIGURE 9.3 – Schéma de présentation générale des expérimentations.

9.4 Les véhicules de test

Les mesures suivantes ont été réalisées en utilisant une Mégane 1,4 l, pesant à vide 1,085 tonne. La distance entre les essieux est de 2,58 m pour 1,59 m d'envergure (mesure au niveau des pneus en externe). Les pneus laissent une empreinte rectangulaire sur le sol de 19 cm (valeur relative à la largeur du pneu) sur 18 cm (valeur du secteur angulaire aplati, c'est-à-dire la mesure du contact pneu-sol prise dans la longueur du pneu). Les pneus ont été gonflés en suivant les recommandations du constructeur pour une utilisation hors autoroute, soit 2,2 bar à l'avant et 2,0 bar à l'arrière.

Le camion de référence appartient au service métrologie du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) d'Angers. Il mesure la déflexion de la chaussée à son passage. Il possède deux essieux. L'essieu avant est composé de deux roues positionnées à chaque extrémité de l'essieu. En statique, cet essieu de 5 128 daN repose sur ces deux pneus de manière symétrique. Le poids reposant sur le côté passager est légèrement plus léger de 0,98 % par rapport à la gauche. L'essieu arrière est constitué de quatre roues, réparties en deux roues de part et d'autre du véhicule. L'espace au sol entre deux roues du même côté est de 15 cm. Le poids imposé par l'ensemble de ce deuxième essieu est de 13 tonnes (13 043 daN), limite légale autorisée sur les routes de France. Cette charge est répartie de manière symétrique (le côté conducteur est légèrement plus léger de 0,99 % par rapport à l'autre côté). Les pneus laissent une empreinte rectangulaire sur le sol de 24 cm (valeur relative à la largeur du pneu) sur 25 cm (valeur secteur angulaire aplati). Tout comme la Mégane, il ne dispose pas de régulateur de vitesse.



FIGURE 9.4 – Camion du LRPC d'Angers.

10.

Expérimentation des capteurs à réseaux de Bragg

10.1 Présentation

Différentes mesures ont été effectuées suite à l'installation des capteurs dans la chaussée. Les premières visent à étudier le comportement statique du capteur. Les deuxièmes montrent les mesures en dynamique, c'est-à-dire lorsque le véhicule de test est en mouvement. Comme présenté dans le paragraphe 7.4.7 page 76, nous nous intéressons aux variations des longueurs d'onde de Bragg. Cela nécessite de considérer une situation initiale qui permet d'établir la grille des longueurs d'onde de Bragg sans sollicitation externe, puis, d'observer l'évolution de ces variations quand une sollicitation statique ou dynamique apparaît. Connaissant la longueur d'onde et le numéro de la fibre optique interrogée, la contrainte peut alors être localisée physiquement sur le capteur. La position 0 de référence est prise par rapport à l'accotement de la route, l'axe positif étant perpendiculaire à l'axe médian de la route et orienté du bord de voie vers cette ligne centrale de séparation des voies (figure 9.3 page 122).

Les deux capteurs installés sont construits suivant le principe détaillé dans le paragraphe 7.4.4 page 72.

10.2 Les mesures statiques

10.2.1 Acquisition des longueurs d'onde de référence

Dans un premier temps, l'enregistrement est réalisé à vide, c'est-à-dire qu'aucune contrainte physique extérieure est exercée sur le capteur. Une cartographie des longueurs d'onde de Bragg

réfléchies est prise avec l'interrogateur à réseaux de Bragg sur le premier capteur, nommé par la suite Capteur à Fibres Optiques (CFO) n°1. Les valeurs obtenues servent de longueur d'onde de référence, avant sollicitation. L'acquisition dure 10 s à raison d'une cartographie de l'ensemble des réseaux, ou échantillon, toutes les millisecondes. Une courbe ayant la forme de la figure 7.11 page 77 doit être observée. Ainsi, pour chaque réseau de Bragg de chaque fibre optique constituant un capteur, dix mille mesures forment chaque longueur d'onde de référence. Pendant cet intervalle, une moyenne, appelée moyenne de référence, est réalisée par longueur d'onde. L'écart-type ne dépasse pas 1,4 pm. Les mesures n'excèdent pas un écart de 5 pm par rapport à la moyenne. Par rapport aux caractéristiques décrites dans le paragraphe 7.4.5 page 74, les performances de l'appareil semblent deux fois moins bonnes que prévu. Théoriquement, les longueurs d'onde ne doivent pas varier. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation. Tout d'abord, l'appareil n'est plus correctement étalonné. Ensuite, un phénomène physique perturbe les réseaux de Bragg (vibration du sol par exemple). L'interrogateur retranscrit alors les perturbations des réseaux de Bragg. Enfin, l'environnement dans lequel est placé l'appareil n'est pas adapté.

Dans la deuxième hypothèse, ces perturbations peuvent provenir de la température ou de la vibration de la résine suite à une personne qui marche à quelques mètres du capteur. En raison de la lenteur de ces deux variations physiques par rapport à des variations des longueurs d'onde, cette hypothèse est peu probable. La première et la dernière hypothèse restent alors plausibles. Suite aux différents transports, l'appareil a pu se dérégler. L'utilisation de cet appareil dans la poussière sur l'accotement et sous le soleil ne lui assure pas un cadre de fonctionnement idéal. Malgré cette imprécision, l'interrogateur a des caractéristiques suffisantes pour observer les variations des longueurs d'onde attendues.

Par la suite, les valeurs affichées pour les mesures statiques correspondent à des valeurs moyennes calculées en post-traitement suite aux enregistrements lors des expériences terrains d'une durée de dix secondes. Chaque valeur est prise toutes les millisecondes.

10.2.2 Le véhicule à l'arrêt sur le CFO n°1

L'avant du véhicule d'essais a été placé à 55 cm environ du bord de la voie sur le CFO n°1. La moyenne des quelques dix mille échantillons est réalisée avant affichage. Sur le même graphique, la moyenne des différentes longueurs d'onde de référence (symbole +) et la moyenne de celles-ci lorsque le véhicule est positionné à 55 cm (symbole x) sont représentées (figure 10.1). Chaque valeur est placée en fonction de sa position physique sur le capteur. Ce graphique représente donc la répartition spatiale des réseaux de Bragg en fonction des différentes longueurs d'onde. Sans pression, les longueurs d'onde n'évoluent pas. Celle-ci augmentent progressivement au fur et à mesure de l'éloignement de la position de référence (position à 0 cm) de part la grille des longueurs d'onde imposée à la construction. D'une manière générale cette figure ressemble à celle représentant l'ensemble des longueurs d'onde de Bragg sur le capteur, numérotée 7.11 page 77. Quelques disparités sont toutefois à noter. Entre chaque fibre optique,

les réseaux de Bragg ne sont pas parfaitement identiques. Ce phénomène est principalement dû à l'influence de la résine sur les réseaux lors de la constitution du capteur, paragraphe 7.4.8 page 79. Quand le symbole + est confondu avec le symbole x sur la figure 10.1, alors aucune variation de la longueur d'onde n'est constatée et par conséquent, aucune pression.

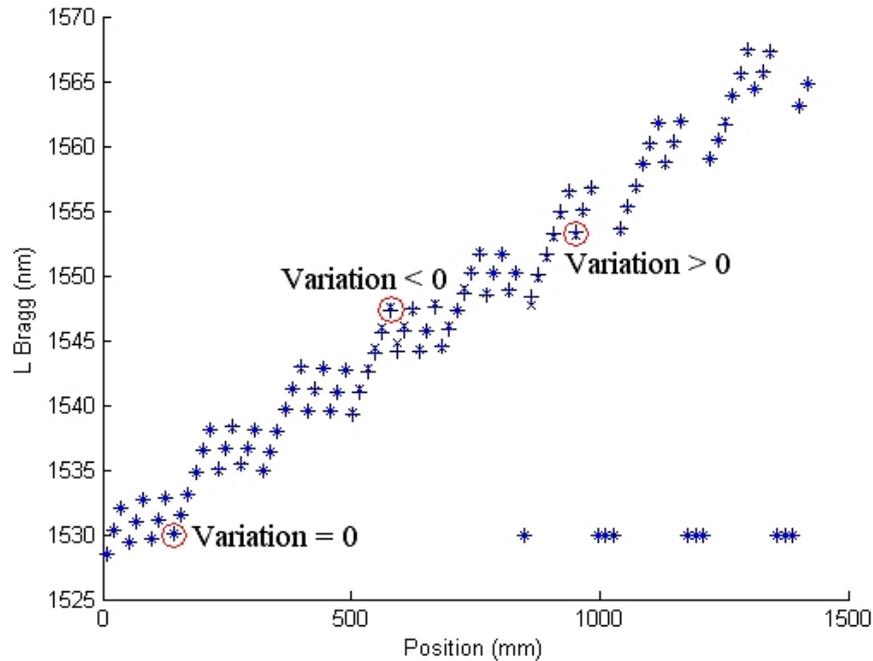


FIGURE 10.1 – Relevé des longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 1 pour la référence sans véhicule (+) et lorsque la contrainte exercée par l'essieu avant du véhicule appui sur le capteur sans déplacement (x) en fonction de la position sur ce capteur.

Pour une meilleure compréhension du graphique, quelques précisions sont nécessaires. Tout d'abord, sur la fibre n°3 (décalée deux fois de 45 mm) composant CFO n°1, dix réseaux de Bragg ne sont plus opérationnels. Ceci est dû à une coupure de la fibre lors de la préparation du capteur. Pour faciliter le traitement réalisé par la suite, un réseau virtuel a été créé, il renvoie la valeur 1530 nm à la fois en valeur de référence et en valeur mesurée. Ensuite, le dernier réseau de la fibre n°4 n'est également pas mesuré par l'interrogateur. Pourtant celui-ci était bien présent lors de la photo-inscription de la fibre. L'immersion de la fibre dans la résine a provoqué une modification du réseau le rendant non détectable par le système d'interrogation (paragraphe 7.4.8 page 79).

La position identifiée du réseau sur la fibre a été prise au milieu de chaque réseau de Bragg. Pour rappel, les réseaux de Bragg fabriqués dans le cadre de ces capteurs mesurent environ 6 mm.

10.2.3 Les remarques sur cette première expérience

Des tests ont été menés en changeant l'extrémité de la fibre optique pour acquérir les mesures des longueurs d'onde des différents réseaux de Bragg. L'interrogateur a toujours été ca-

pable de relever les mêmes mesures. Cette expérience confirme la réversibilité d'interrogation du capteur.

Par la suite, les positions sont de préférence exprimées en centimètre car les fibres ont été décalées et positionnées par un opérateur humain. La pose manuelle du capteur dans l'enrobé introduit également une nouvelle source d'erreur. Elle peut être significative (de l'ordre de quelques millimètres).

De faibles variations de longueur d'onde de Bragg sont observées entre l'état de référence et l'état avec lequel le véhicule est positionné sur le capteur. Pour convenablement distinguer la différence entre les longueurs d'onde centrales des réseaux de Bragg, il suffit de tracer la courbe représentant ces variations (différence de mesure entre ces deux états à savoir la différence entre l'état de référence et l'état avec le véhicule) en fonction de la position sur le capteur 10.2.

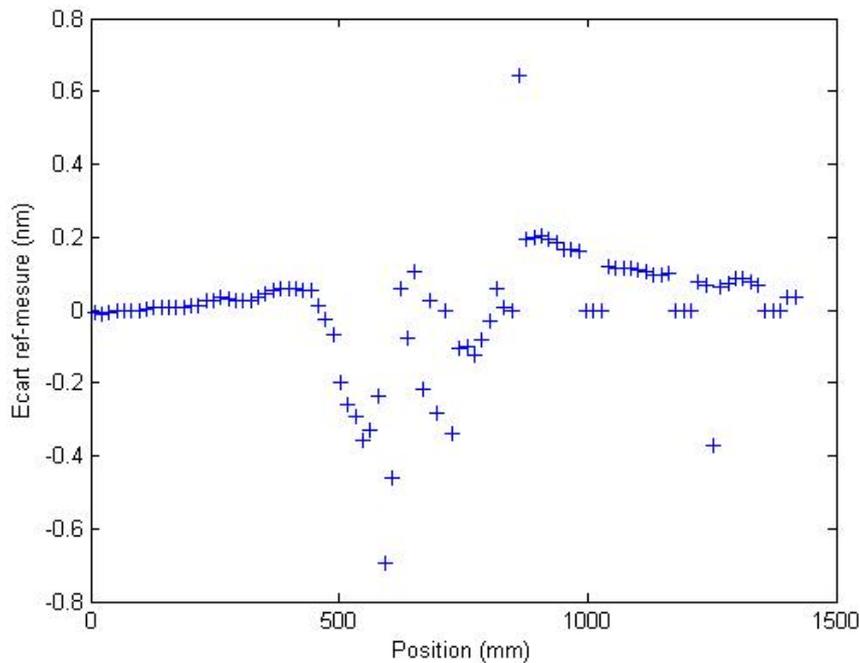


FIGURE 10.2 – Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position de la roue sur ce capteur.

En délaissant certaines valeurs extrêmes, les points peuvent être réunis selon la forme de la lettre « W ». Comment expliquer cette forme ? Les réseaux allongés devaient simplement effectuer un pic. Sous la pression exercée par le véhicule sur la route, la fibre est étirée. Les réseaux de Bragg sont eux aussi soumis à cet étirement. L'étirement du réseau provoque un allongement du pas du réseau. D'après la formule $\lambda_b = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$ (équation 7.4), la longueur d'onde centrale de Bragg augmente quand le pas s'allonge, pour un indice du milieu constant. La différence entre une mesure de référence sans véhicule et avec un véhicule varie vers les valeurs négatives quand un réseau de Bragg est étiré. Cependant, les relevés forment un W plutôt qu'un V. La fibre est principalement étirée aux jonctions entre la zone sans pression et la zone avec pression exercée par le pneu du véhicule. Sous cette surface de contact, la contrainte

est plus homogène ce qui entraîne un étirement faible au centre du pneu. Ce phénomène se traduit par une variation nulle au centre de la zone de pression. La forme en V intervient quand le solide est considéré comme une masse ponctuelle.

Cette forme en W n'est pas régulière. Cette variation s'explique en tenant compte du processus de fabrication du capteur. La résine englobant la fibre ne se répartit pas de manière régulière. Sa planitude n'est pas parfaite. La résine se forme par réaction chimique entre deux substances. Ce mélange n'est pas toujours homogène et est très sensible à la fois à l'humidité et à l'aération du milieu (emballage thermique). Lors de la fabrication des capteurs, les conditions d'utilisation du produit n'étaient pas optimales. Des irrégularités de densité et de résistance sont apparues entraînant des comportements de la résine différents suivant l'emplacement d'une même contrainte.

D'après la figure 10.2, le véhicule testé a engendré une déformation provoquant la variation d'environ 0,4 nm de la longueur d'onde centrale de Bragg. Il existe une symétrie dont l'axe est situé à 64 cm de l'extrémité du capteur. Cet axe se situe au centre de l'empreinte du pneu soit vers 64 cm à partir du bord de la voie. Les déformations minimales sont localisées à 55 cm (-0,36 nm) et 73 cm (-0,34 nm) soit un écart de 18 cm. Pour rappel, le véhicule est équipé de pneus dont l'empreinte au sol dans ce même sens mesure 19 cm. Des variations sont cependant visibles dès 44 cm jusqu'à 84 cm, soit sur une zone de 40 cm de large. Ce résultat montre que le capteur repère le véhicule en statique et qu'il peut le localiser.

La longueur centrale d'un réseau de Bragg fluctue à la fois suivant la température, 12 pm par °C à 1 550 nm, et suivant la pression exercée sur son réseau ou son étirement dans le cas présent, 1,2 pm par $\mu\epsilon$ à 1 550 nm. La fibre étant noyée dans de la résine, la variation de température entre l'acquisition de la mesure de référence et de la mesure lorsque le véhicule est présent sur le capteur peut être considérée comme négligeable (0,05 nm en effectuant une nouvelle mesure de référence toutes les heures). Ainsi toutes les variations des longueurs d'onde des CFO sont uniquement dues à un phénomène d'étirement des fibres optiques. La température n'influe pas sur la localisation. Part la mesure de ces variations, la contrainte est localisable.

10.2.4 Le véhicule à l'arrêt sur le CFO n°2

Un deuxième CFO a été fabriqué sur le même principe. Pour l'évaluer, la même voiture de test présentée précédemment, a, dans un premier temps, été placée sur ce capteur à 35 cm environ par rapport au repère 0 de la zone sensible. Les mêmes graphiques ont été tracés, à savoir : la mesure des longueurs d'onde centrales des réseaux de Bragg avant et après positionnement d'une masse à un endroit donné sur le capteur, figure 10.3, et le relevé des variations des longueurs d'onde (exprimé par une différence) en fonction de leur position physique, figure 10.4. Sur ce deuxième CFO, la position de la fibre n°2 a été inversée par rapport aux autres suite à un problème technique. Ainsi, la longueur d'onde la plus élevée se situe au plus près de la position 0 uniquement sur cette fibre. Les positions physiques de ses réseaux par rapport à ce capteur optique ont été corrigées par un post-traitement afin d'afficher correctement

les longueurs d'onde des réseaux de Bragg en fonction de leur position (figure 10.3). Comme pour la première expérience, la figure 10.3 présente des longueurs d'onde centrales de Bragg croissantes en rapport avec l'augmentation de leur position physique, à l'exception bien évidemment de la fibre n°2. Cette inversion n'entraîne bien évidemment aucune différence dans le fonctionnement du capteur à partir du moment où la position physique des réseaux est connue.

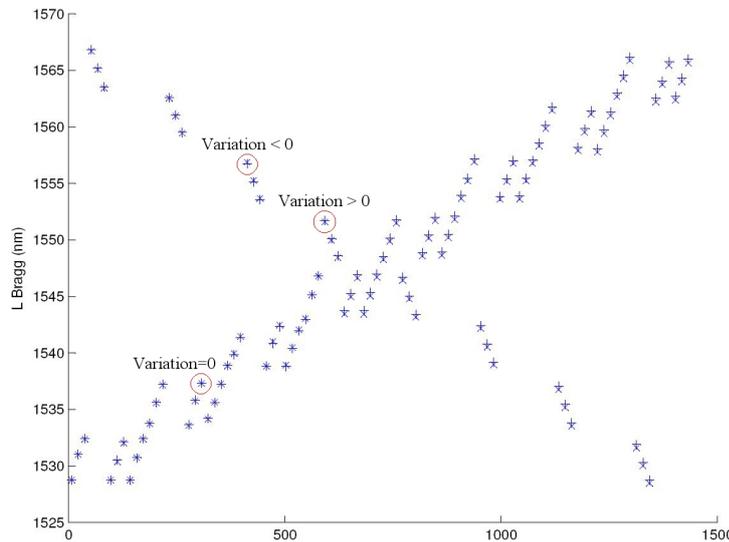


FIGURE 10.3 – Relevé des longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 pour la référence sans véhicule (+) et lorsque la contrainte exercée par l'essieu avant du véhicule appui sur le capteur sans déplacement (x) en fonction de la position sur ce capteur.

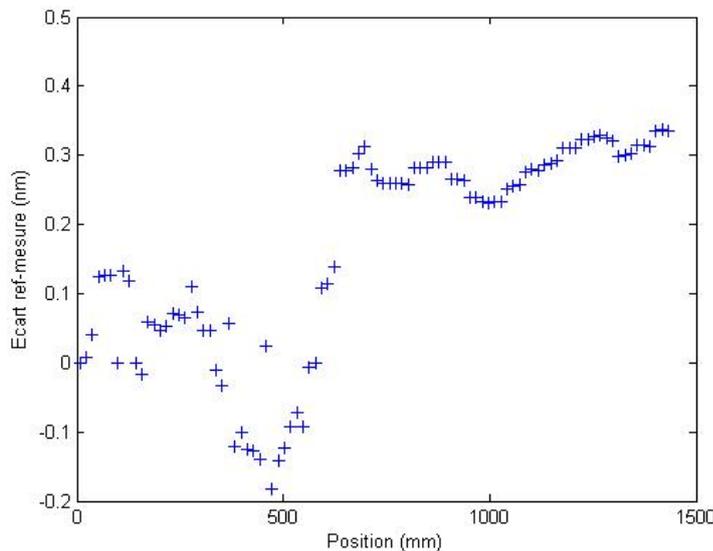


FIGURE 10.4 – Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 2 en fonction de la position sur ce capteur.

Sur le CFO n°2, six réseaux sur 96 ne sont pas visibles par l'interrogateur à réseaux de Bragg (cf. 7.4.8). La résine appliquée lors de la dernière couche a anormalement gonflé. Cela est dû à un taux d'humidité important et/ou un emballement thermique de la réaction. Un seul pic est

vraiment présent engendrant une variation de -0,18 nm. Les différences calculées après 50 cm sont anormalement élevées. En effet, une variation moyenne de 0,28 nm est constatée. Deux hypothèses peuvent émerger : soit les fibres optiques sont compressées pendant un mètre par compensation à l'étirement provoqué par le poids du véhicule, soit la référence a variée. La première hypothèse est moins crédible car elle implique que la fibre soit compressées sur un mètre de manière homogène, ce qui paraît peu probable. La deuxième hypothèse semble plus vraisemblable car la mesure de la référence a été prise lorsque le capteur a été posé dans la chaussée mais sans qu'aucun véhicule n'ait préalablement roulé dessus. La résine étant plus molle que sur le premier capteur, son état de repos a varié expliquant ces différences de longueurs d'onde. Ces mesures ainsi que les précédentes ayant été prises lors de la même demi-journée, l'influence de la température ne peut être mise en cause. Cette différence de dureté explique également la forme particulière en « V » et non en « W » comme précédemment. Le pic correspondant au bas du « V » est alors à associer au centre du pneu. Sachant que le pneu fait 19 cm de large, l'extrémité du pneu, côte rive, est alors donnée à 37 cm, soit un écart de 2 cm avec la mesure donnée en utilisant un mètre.

10.2.5 Bilan

L'ensemble du deuxième capteur se déforme plus facilement à cause d'une résine plus souple. Cependant les fibres ne sont que légèrement plus étirées que précédemment. La mesure du dénivelé entre le pic et la valeur moyenne de référence est de 0,47 nm dans le cas de CFO n°2 contre 0,43 nm dans le cas de CFO n°1. Par ailleurs, la profondeur d'enfouissement du capteur n'est pas nécessairement la même (ornière sur la route).

Il faut également rappeler que ces mesures sont issues des premières tests. D'après les courbes obtenues, un temps d'adaptation est nécessaire à la résine et au capteur pour arriver à une position d'équilibre mécanique. Ce temps n'a pu être quantifié et pris en considération pendant ces premiers tests.

L'ensemble de ces mesures n'est pas suffisant pour valider le fonctionnement sur le long terme de ce capteur. Les véhicules étant en mouvement sur les routes, des tests en dynamique sont nécessaires pour valider le fonctionnement du capteur en présence d'un trafic quotidien. Cependant, il réagit comme cela avait été évoqué dans la partie théorique (paragraphe 7.4.7 page 76). L'étirement est plus marqué dans la zone sur laquelle repose le pneu. L'ensemble de la fibre semble toutefois sollicité.

10.3 Les mesures en dynamique à faible vitesse

Dans l'étape précédente, il a été démontré par expérimentation que les CFO fabriqués et installés dans une chaussée de route renvoient une information cohérente de la position d'un

véhicule appuyant sur ce capteur. Cependant, l'objectif visé consiste à utiliser ce nouveau capteur dans un contexte de métrologie de la route. Il s'agit donc de visualiser cette position lorsque le véhicule est en mouvement. Cette nouvelle expérience consiste à faire avancer et reculer la voiture test sur ce capteur et d'effectuer un relevé des longueurs d'onde centrales de Bragg. Lors de ce test, la voiture a effectué une manoeuvre de marche avant puis de marche arrière plusieurs fois de suite en restant à la même position latérale : 35 cm.

Les mesures suivantes ont été prises sur CFO n°2. Les variations des réseaux de Bragg les plus importantes sont engendrées par des contraintes plus significatives. Elles représentent donc les zones de pression dues au véhicule (partie gauche de la figure 10.5). La partie droite présente les signaux obtenus si une nouvelle mesure de référence avait été prise avant le déplacement du véhicule sur le capteur. En effet, l'ensemble du capteur et de son conditionnement n'est pas encore stabilisé. Les plus grandes variations semblent avoir lieu aux alentours des 50 cm.

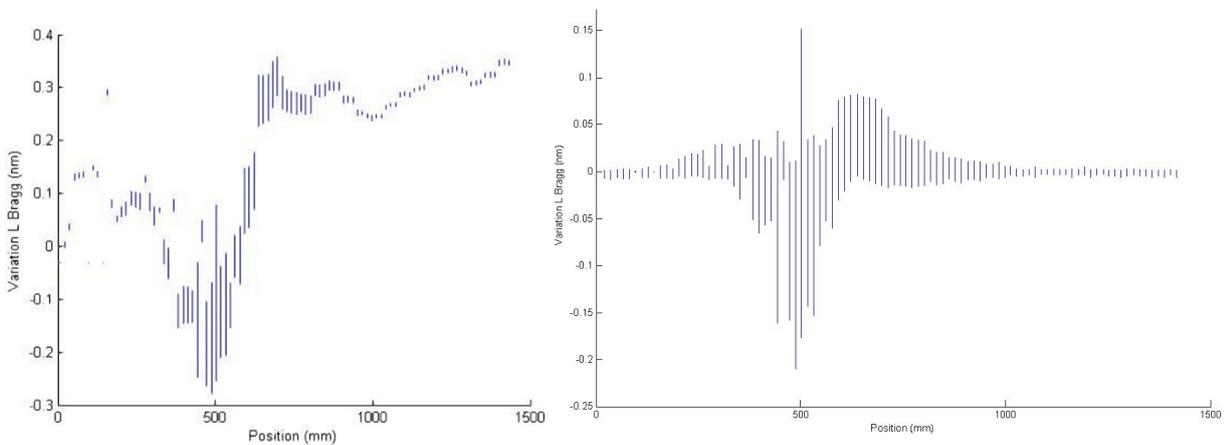


FIGURE 10.5 – Relevé des variations de longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière, marche avant) en fonction de sa position le long du capteur avec à gauche le relevé réel et à droite le relevé suite à un changement de la référence.

Les variations de la partie gauche de la figure 10.5 semblent familières. En effet, le graphique 10.4 présenté dans le paragraphe précédent évolue de manière similaire. La mesure de référence a été prise alors qu'aucun véhicule n'avait encore roulé dessus. Les passages de la voiture ont modifié le système initial, créant un nouvel équilibre. Cependant, les variations les plus grandes ne sont pas localisées aux mêmes endroits. Dans cette expérience, la variation la plus importante se situe au voisinage des 50 cm.

Cependant, ces variations sont évaluées pour l'ensemble du déplacement. Or, il se peut que le véhicule se soit déplacé latéralement. L'étude temporelle de ces variations permet d'observer chaque phase d'évolution (figures 10.6, 10.8, 10.7). Trois zones de perturbations des longueurs d'onde sont détectables. Toutes les manoeuvres, marche avant - marche arrière, n'ont pas été enregistrées durant les 10 s. Néanmoins, la détection de différentes zones de variations montre la possibilité du capteur à détecter au moins le passage d'un véhicule à faible vitesse.

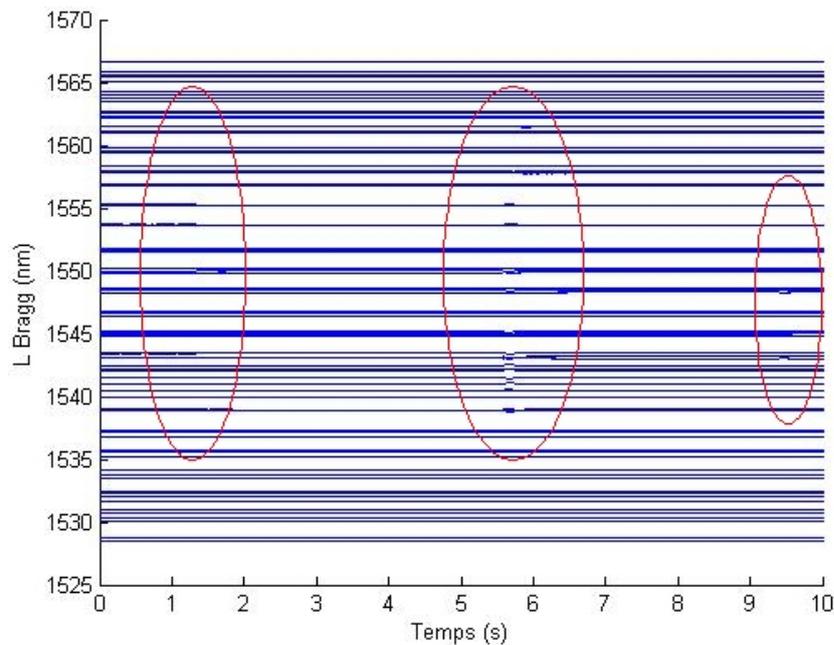


FIGURE 10.6 – Relevé des longueurs d’onde de Bragg centrales sur CFO 2 d’une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction du temps.

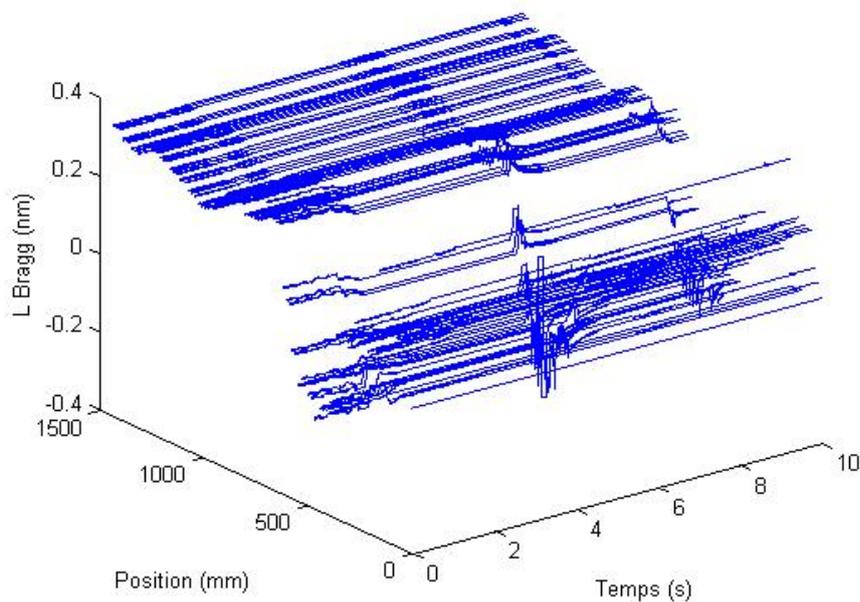


FIGURE 10.7 – Relevé des variations de longueurs d’onde de Bragg centrales sur CFO 2 d’une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction de la position le long du capteur et du temps.

La représentation en 3D, figure 10.7, des mesures des longueurs d’onde en fonction de la position sur le capteur et du temps, ne révèle rien de bien significatif sur un document papier. En effet, les variations sont faibles par rapport à la visualisation générale. Il est donc nécessaire de faire une étude fine sur chaque zone présentant une variation. Chaque pic doit être dissocié

de l'ensemble. Le relevé des variations par zone permet de positionner le véhicule à chaque fois que celui-ci passe sur le capteur. Comme précédemment, le centre du pneu est évalué à 50 cm pour les trois zones ; La zone est étirée (variation maximale d'environ -0,19 nm).

En utilisant cette représentation, il est impossible d'affirmer s'il s'agit d'un phénomène de compression ou d'étirement. Le tracé de la figure 10.8 permet cette distinction. La partie gauche montre les variations obtenues en prenant la mesure de référence avant les expérimentations. La partie de droite montre ces mêmes changements en tenant compte d'une deuxième référence que nous avons créé. Celle-ci considère l'ensemble résine-capteur lorsqu'il est mécaniquement stabilisé. Sur certains réseaux un autre phénomène se produit. Avant d'être étiré, le réseau est compressé. Cette compression engendre une variation pouvant atteindre 0,04 nm. Le temps de passage du pneu est mesuré à 0,17 s (figure 10.8).

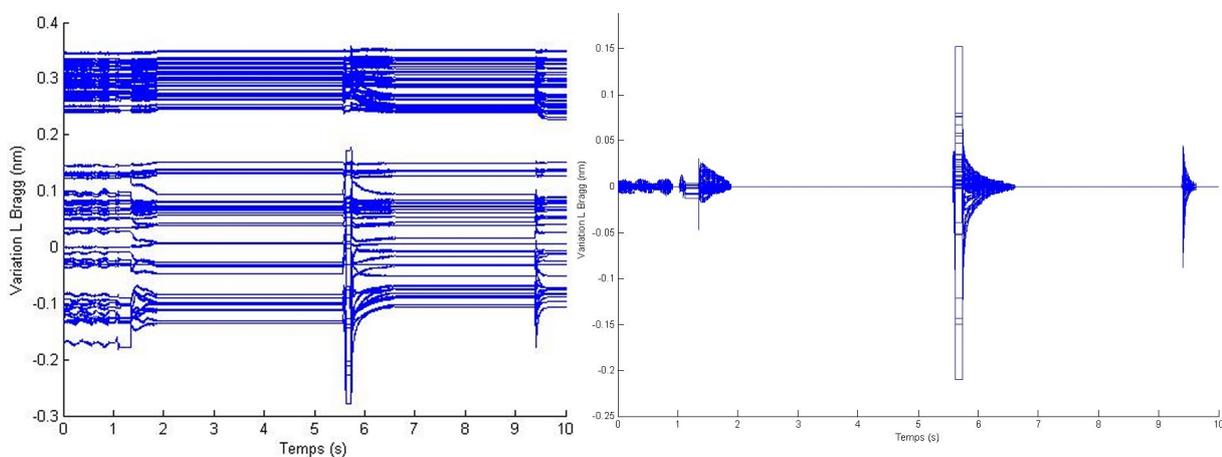


FIGURE 10.8 – Relevé des variations de longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction du temps.

10.4 Les effets du passage du camion de référence du LRPC sur les CFO

Les dernières expériences ont eu lieu le 15 mai 2009, soit dix mois après la pose des capteurs. Pour indication, le trafic de cette route s'élève à environ deux milles véhicules par jour et par voie de circulation. Le taux de poids lourds est de 10 % environ. Au cours de ces dernières expérimentations, des résultats sont présentés suite au passage du camion du LRPC d'Angers (49) décrit dans le paragraphe 9.4 page 123 pour différentes positions et vitesses. Le capteur est filmé par une caméra lors du passage du camion. L'utilisation d'un marquage sur le capteur crée un repère visuel pour corréliser la position du véhicule donnée par la caméra avec la position donnée par les CFO. L'interrogateur à réseaux de Bragg est positionné sur le bord de la route à proximité des fibres. Une batterie de voiture assure son alimentation. Par cette configuration, les quatre fibres constituant chaque capteur sont interrogées en même temps. Pour plus de lisibilité

de ce document, les figures concernant les passages 5 et 19 sont présentées en annexe D (figures D.11 à D.21).

Quel que soit le cas d'étude, les différents essieux sont correctement détectés (exemple lors du premier passage à 90 km/h sur les figures 10.9, et 10.10). Ces expériences ont été menées sur une route sèche à une température comprise entre 10 °C et 20 °C.

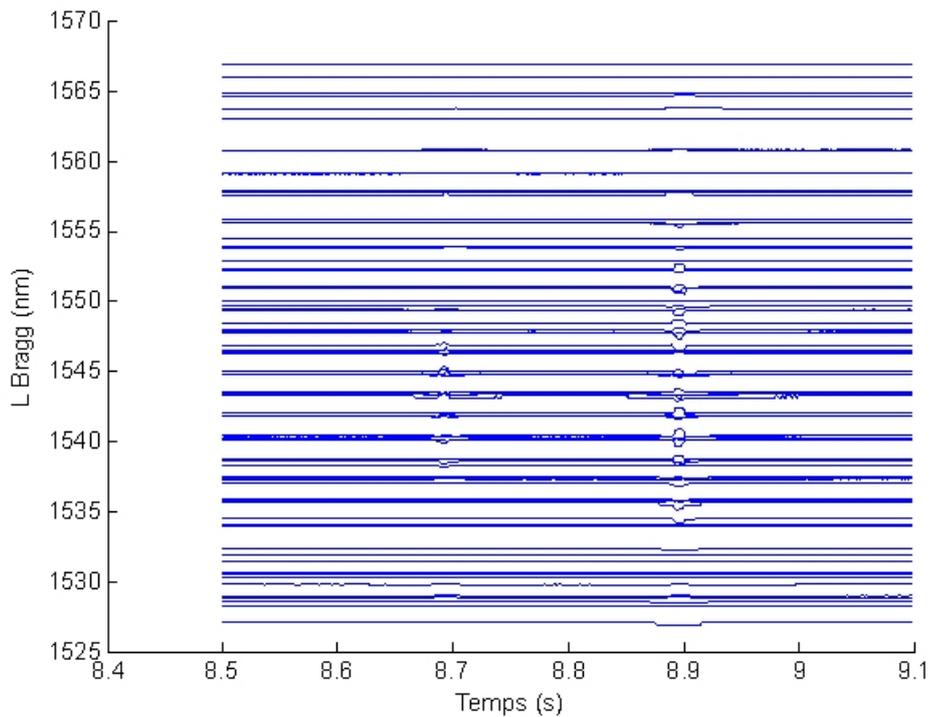


FIGURE 10.9 – Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction du temps.

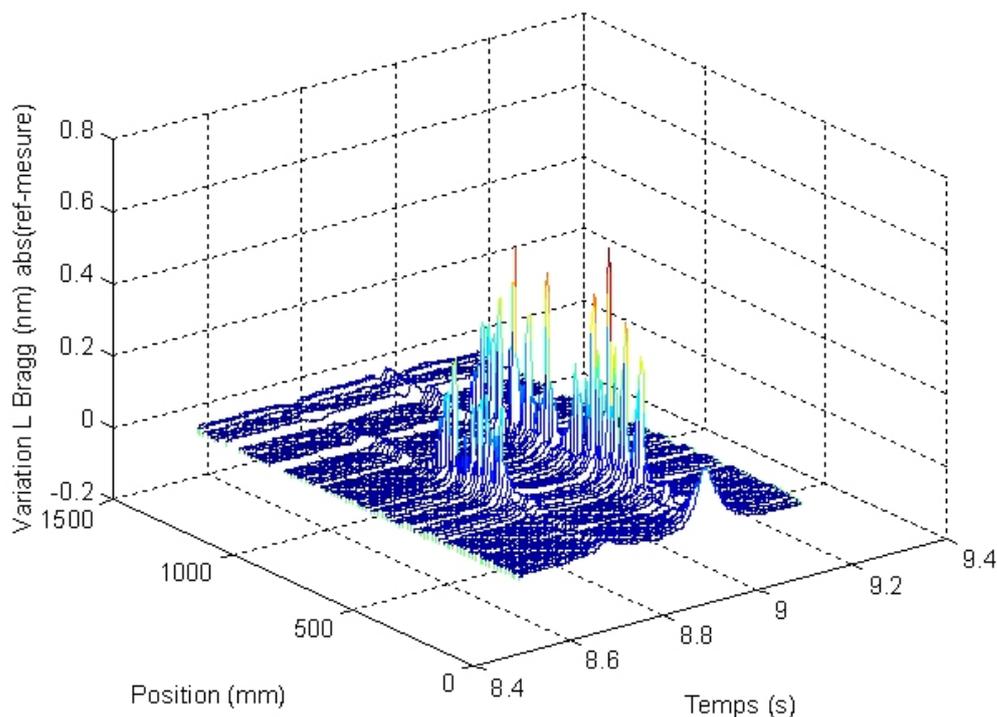


FIGURE 10.10 – Passage 1 - Variations en valeur absolue des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg, |référence - mesure| sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

10.4.1 Les effets du passage du camion sur les capteurs suivant des positions latérales différentes sur la chaussée

Sur cette route départementale, la vitesse est limitée à 90 km/h. Le poids lourd a effectué dix passages à cette vitesse en roulant à différentes positions latérales sur les capteurs. Deux résultats sont présentés : un dans lequel le poids lourd est localisé plus vers la rive droite et l’autre dans lequel il est plus vers l’axe. Le camion roule dans le sens Marans vers Segré. L’acquisition est réalisée sur CFO n°1. Ce capteur ignore l’information provenant des dix réseaux absents (suite à un problème de manipulation lors de la pose) sur la fibre n°3 et les cinq derniers de la fibre n°4 dont les informations sont trop fluctuantes pour être exploitées. Lors des passages 1 et 5, le poids lourd de test roule à la même vitesse. Seule la position latérale change.

Préalablement à cette étude, différents véhicules pris dans la circulation ont servi pour les tests. Les véhicules légers sont difficilement repérables avec ce capteur conditionné dans de la résine. Les poids lourds sont détectés. Certains de ces résultats sont présentés en annexe D.

10.4.1.1 Les effets de l’essieu avant sur le capteur optique

L’essieu avant est composé de deux roues. Quelle que soit la position du poids lourd sur sa voie, seul le pneu avant droit exerce une pression sur le capteur. Deux de ces passages sont ordonnés dans le tableau 10.1.

10.4 - Les effets du passage du camion de référence du LRPC sur les CFO

Paramètres	passage 1		passage 5	
	rive	axe	rive	axe
Position du pneu observée par la vidéo (cm)	43	68	76	100
Position du pneu distinguée par le CFO (cm)	46	70	77	97*
Largeur de l’empreinte connue (cm)	24		24	
Largeur de l’empreinte observée par la vidéo (cm)	25		24	
Largeur de l’empreinte distinguée par CFO ($\lambda_{Bragg} > 0,2$ nm) (cm)	24		20*	
Delta temps excitation du capteur (ms)	53		68	
Delta temps à 10 % de la variation max de λ_{Bragg} (ms)	12		13	
Amplitude λ_{bmin} (nm)	-0,348		-0,354	
Amplitude λ_{bmax} (nm)	0,29		0,418	

*En raison de la non présence de dix réseaux de Bragg sur la fibre 3 de CFO n°1, l’information entre le point 982,5 mm et 1043 mm n’est pas connue ce qui conduit à une moins bonne perception de l’empreinte du pneu sur le capteur.

Tableau 10.1 – Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l’essieu avant lors des passages 1 et 5.

La variation de la longueur d’onde est tantôt négative, tantôt positive. Dans d’autres situations, elle est positive et négative. Une variation négative entraîne une augmentation de la longueur d’onde de Bragg représentant un étirement de la fibre. Dans le cas contraire, il s’agit d’une compression. Ce comportement particulier est engendré par le passage d’un véhicule sur le capteur. Le véhicule entraîne une modification locale de la résine et donc du capteur. Ces variations particulières étaient déjà présentes sur la figure D.3. Peu importe la perception de l’un ou de l’autre des effets, le résultat réside toujours en une modification de l’étirement de la fibre optique à un endroit donné. Dans le cas présent, seules les variations nous intéressent. Ainsi nous pouvons utiliser la valeur absolue de la variation pour repérer l’empreinte laissée par le pneu sur le capteur comme sur les figures 10.12 et D.18.

Les figures 10.14 et D.20 identifient la réponse du capteur à une sollicitation. La première mesure de temps prise à l’aide de ces tracés indique la durée pendant laquelle la fibre optique est perturbée par le passage du véhicule. Cette perturbation arrive bien avant que la roue soit sur le capteur. La deuxième mesure de temps correspond au temps pendant lequel le signal est fortement perturbé. Ce temps est mesuré aux instants où le signal dépasse une amplitude de 10 % de son excursion totale puis repasse sous cette même amplitude (paragraphe 7.4.7 page 76). Chaque réseau de Bragg délivre une information unique. De plus, ils sont conditionnés de manière différente (variation de la hauteur de résine suivant le relief de la route). Comme chaque réseau sollicité répond de manière propre, ces durées sont donc une estimation des réponses pour l’ensemble des capteurs. L’effet global de la sollicitation sur chaque réseau est visible sur les figures 10.13 et D.19.

Les largeurs de pneus et les mesures des positions sont prises lorsque les variations des longueurs d’onde de Bragg sont supérieures à 0,2 nm. Cette valeur représente la moitié de la

variation maximale des longueurs d'onde. La largeur de l'empreinte connue est extraite de la surface d'appui du pneu donnée paragraphe 9.4 page 123.

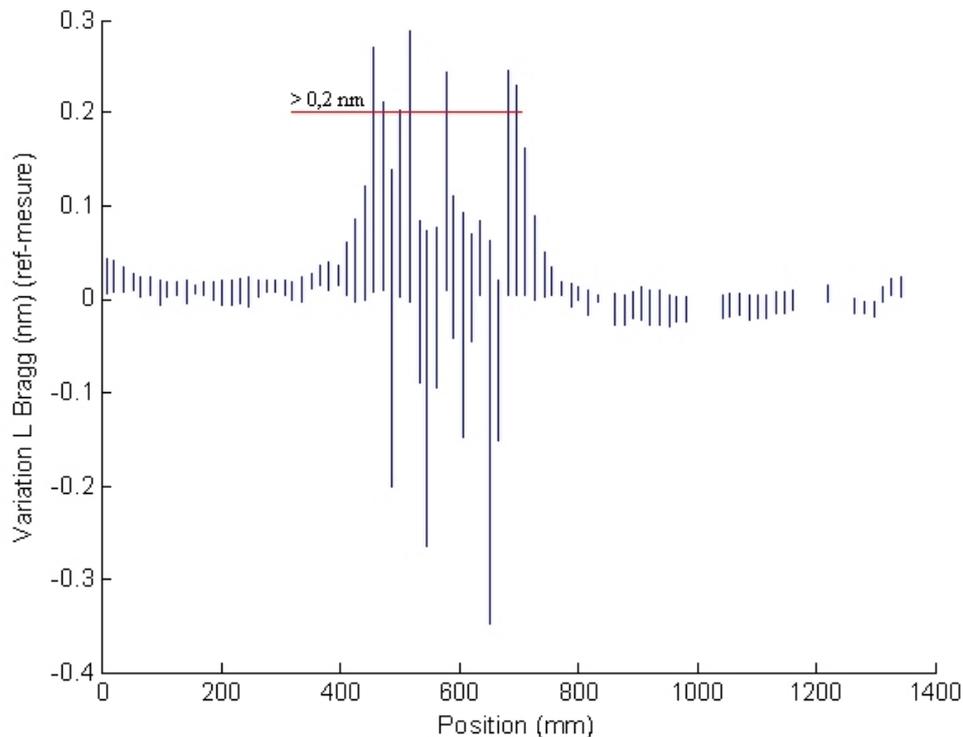


FIGURE 10.11 – Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

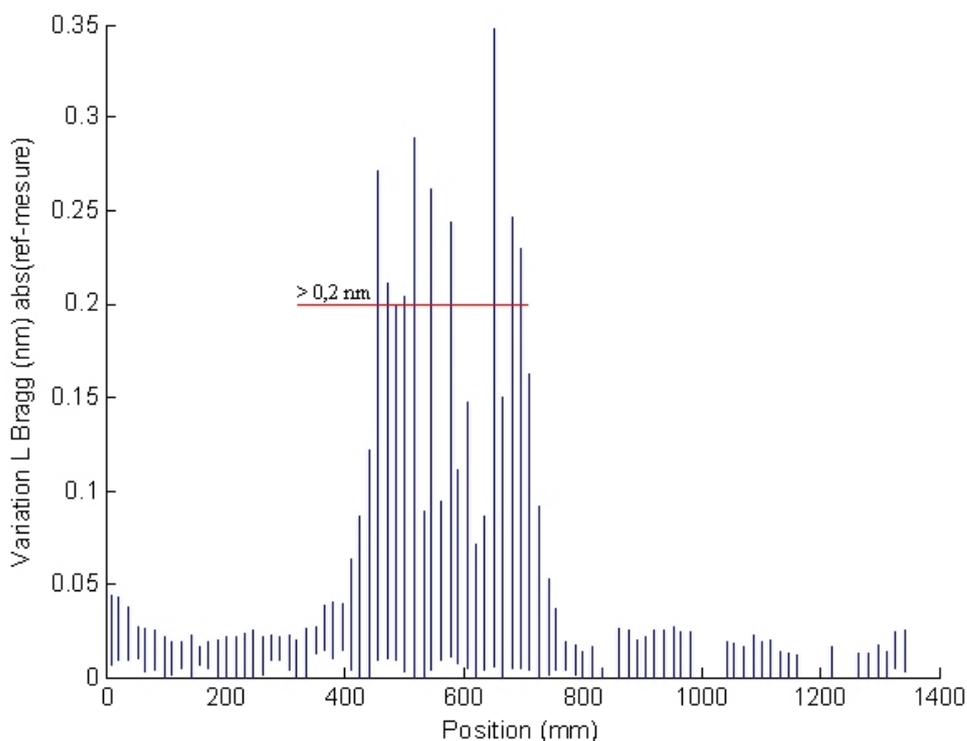


FIGURE 10.12 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (|référence - mesure|) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

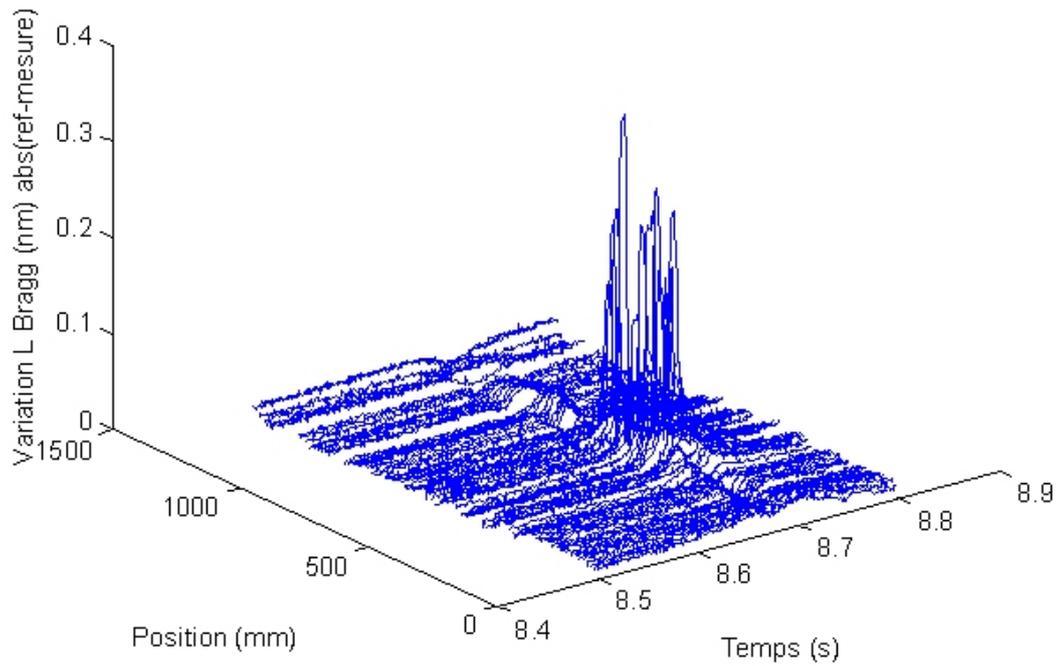


FIGURE 10.13 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg (|référence - mesure|) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.

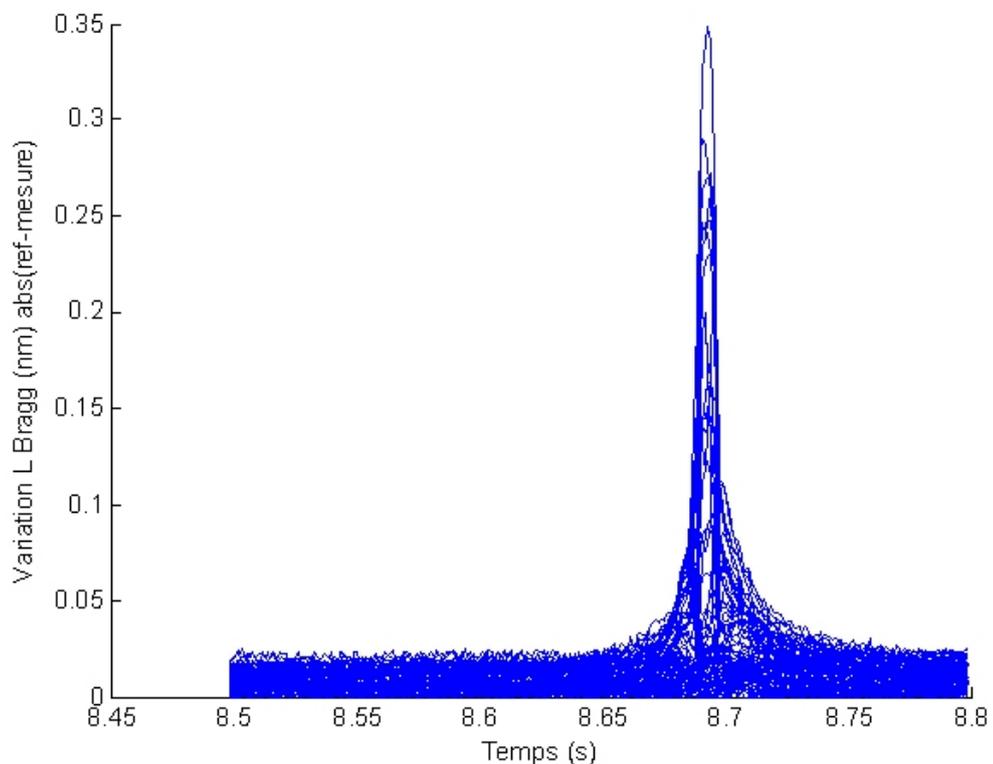


FIGURE 10.14 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg (|référence - mesure|) sur CFO 1 en fonction du temps.



FIGURE 10.15 – Passage 1 - Image extraite de la vidéo montrant le pneu avant droit sur le capteur à fibres optiques.

Sur les deux figures 10.12 et D.18, les réseaux sont comprimés sur les extrémités du pneu. Sous la surface du capteur pressée par le pneu, les réseaux subissent des extensions mais également des compressions.

Au final, la position du véhicule et la largeur des pneus sont estimées avec un écart de 3 cm pour ces deux passages.

10.4.1.2 Les effets de l'essieu arrière sur le capteur optique

L'essieu arrière est composé de quatre roues et supporte 13 tonnes. Quelle que soit la position du poids lourd dans sa voie, seuls les pneus arrière droits exercent une pression sur le capteur. Les relevés provenant des passages 1 et 5 sont ordonnées dans le tableau 10.2 et font référence aux figures ci-dessous.

10.4 - Les effets du passage du camion de référence du LRPC sur les CFO

	passage 1				passage 5			
	pneu rive	rive axe	pneu axe	rive axe	pneu rive	rive axe	pneu axe	rive axe
Position du pneu par la caméra (cm)	25	50	65	(89)*	60	85	100	(124)*
Position du pneu par CFO (cm)	28	55	67	94	61	90	99	130
Largeur de l'empreinte connue (cm)	24		24		24		24	
Largeur de l'empreinte par la caméra (cm)	25		(24)*		25		(24)*	
Largeur de l'empreinte par CFO ($\lambda_{Bragg} > 0,2$ nm) (cm)	27		27		29		31	
Delta temps excitation du capteur (ms)	93				94			
Delta temps à 10 % de la variation max de λ_{Bragg} (ms)	12				12			
Amplitude λ_{bmin} (nm)	-0,390				-0,469			
Amplitude λ_{bmax} (nm)	0,655				0,447			

(*) Valeur estimée par la connaissance de la dimension de la surface de contact.

Tableau 10.2 – Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l'essieu arrière lors des passages 1 et 5.

La mesure de la largeur de pneus est relevée quand les variations des longueurs d'onde de Bragg sont supérieures à 0,2 nm. Les figures 10.16, 10.17, D.23 et D.22 montrent bien deux zones distinctes. Elles sont séparées par un espace (tableau 10.2). Sur ces figures, les centres de ces zones sont bien distincts. Les pics les plus élevés apparaissent en ces centres. Les variations des longueurs d'onde évoluent plus significativement (x2 des amplitudes) ce qui montre bien la contrainte plus importante qui s'exerce sur les réseaux.

Au passage des essieux, l'ensemble des fibres est affecté par une variation. Cependant elle reste minimale (généralement inférieures à 0,1 nm voire 0,05 nm) par rapport aux variations représentant l'empreinte des pneus sur le capteur. Comme pour l'essieu avant, le passage de l'essieu arrière engendre à la fois des extensions au sein de la fibre mais également des compressions (variations supérieures à 0).

Les figures 10.19 et D.25 renseignent au sujet de l'intensité de la sollicitation dans le temps. Celle-ci est plus marquée que dans le cas de l'essieu avant (tableau 10.1). Le poids plus élevé de l'essieu arrière agit davantage sur la chaussée et donc sur le capteur, avant, pendant et après son passage. Ainsi, les variations durent plus longtemps. Cependant, l'impulsion des pics entre deux amplitudes à 10 % du signal reste environ constante. Ce résultat semble logique dans la mesure où la vitesse du véhicule est presque identique dans les deux cas (véhicule non équipé d'un régulateur de vitesse). L'effet global de la sollicitation sur chaque réseau est visible sur les

figures 10.18 et D.24. La figure 10.20 permet de visualiser l'expérimentation : les deux roues de l'essieu arrière droit passant sur le capteur CFO n°1.

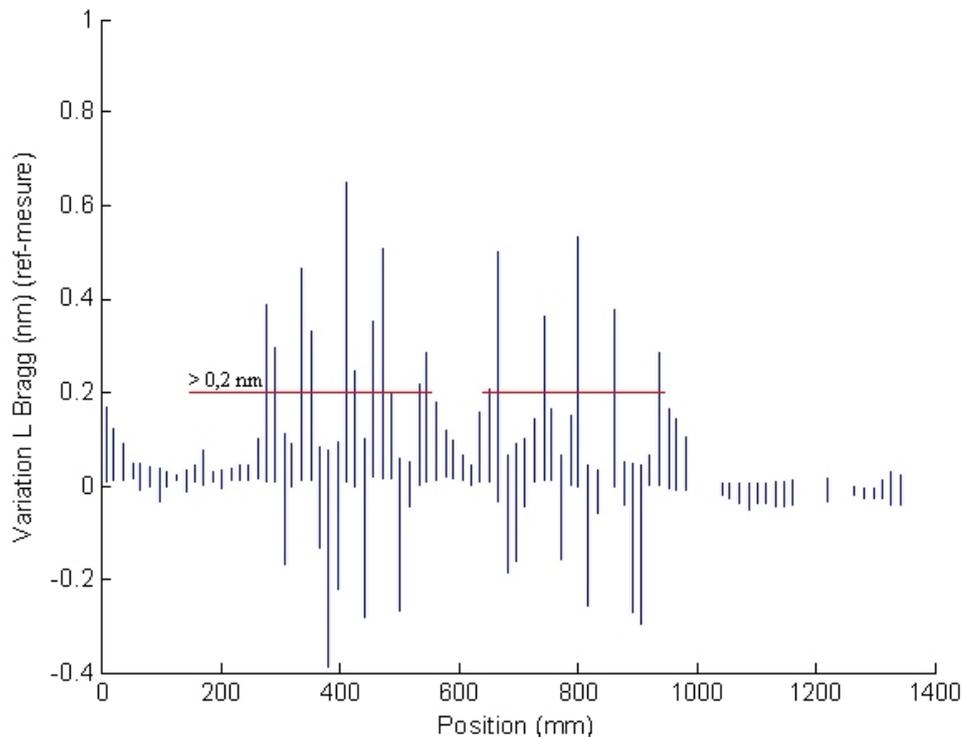


FIGURE 10.16 – Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

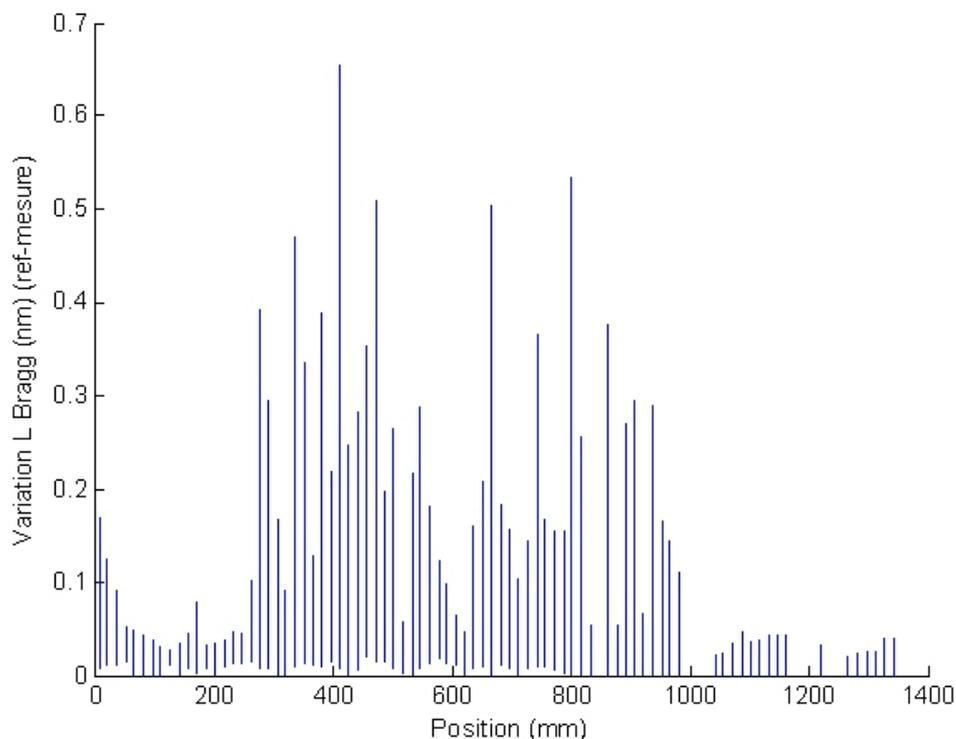


FIGURE 10.17 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg ($|\text{référence} - \text{mesure}|$) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

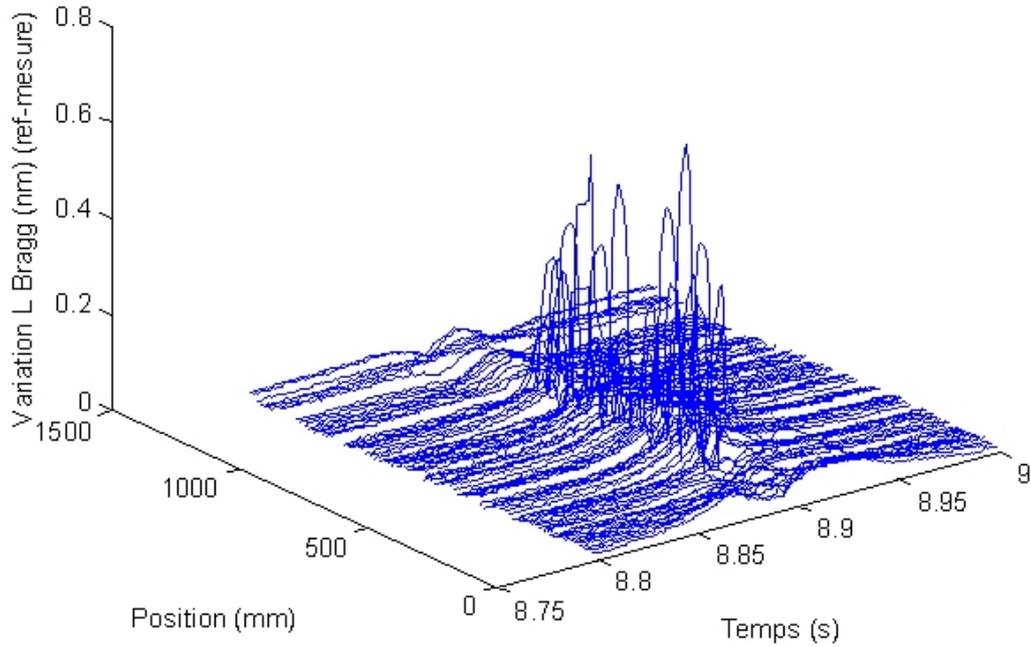


FIGURE 10.18 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg ($|\text{référence} - \text{mesure}|$) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.

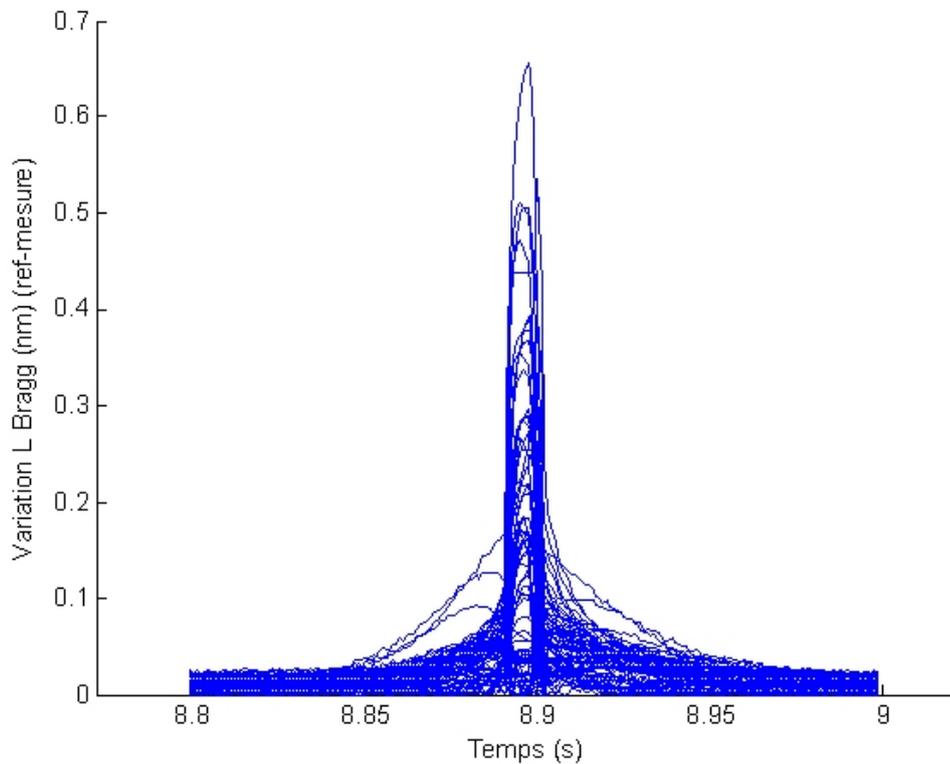


FIGURE 10.19 – Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg ($|\text{référence} - \text{mesure}|$) sur CFO 1 en fonction du temps.



FIGURE 10.20 – Passage 1 - Image extraite de la vidéo représentant l'essieu arrière sur le capteur à fibres optiques.

10.4.1.3 Bilan

Pour ces deux passages, les deux pneus de l'essieu arrière sur le côté droit ont pu être correctement distingués. Il faut rappeler que la vitesse du véhicule est de 25 m/s soit 90 km/h. A cette vitesse, la distance séparant les deux pneus arrières droits et mesurée par ce capteur optique varient entre 9 et 15 cm. La distance réelle les séparant est de 15 cm, soit une erreur maximale de 6 cm avec ce système. Les positions externes des pneus ont été localisées à 5 cm près. La largeur des pneus a été mesurée à 7 cm près. Entre les deux passages, l'erreur de mesure est plus significative sur l'essieu arrière que sur l'essieu avant (6 cm contre 3 cm), et plus particulièrement quand les pneus se situent au milieu de la voie. Ces résultats peuvent être dus à un poids plus important sur l'essieu arrière (13 tonnes) qui engendre des contraintes plus fortes sur les réseaux autour de la surface de contact pneu-chaussée par rapport au cas de l'essieu avant. D'après les courbes, ce n'est pas toujours le cas. Un milieu non homogène peut alors expliquer cette différence. Par ailleurs, un positionnement différent du capteur en profondeur peut également être en cause (présence d'ornières notamment dans la zone de roulement).

Le temps de passage d'un véhicule à une vitesse donnée est constant quelque soit la position. Ce résultat est cohérent puisque la vitesse est identique.

Cependant avec un passage, des données sur trois pneus sont recueillies. Avec les deux passages présentés, le nombre de mesure n'est pas suffisant pour définir correctement la précision. Des mesures complémentaires sont donc nécessaires.

10.4.2 Les effets du passage du camion en fonction de la vitesse

Le camion du LRPC circule sur la route D 961. Des acquisitions sont effectuées sur les CFO. Les résultats obtenus sur CFO n°2 sont présentés suite à cette expérimentation. Les passages 19 et 14 s'effectuent avec une vitesse respectivement de 90 km/h et de 50 km/h.

10.4.2.1 Les effets de l'essieu avant sur le capteur optique

Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 10.3.

	Passage 19		Passage 14	
	rive	axe	rive	axe
Position du pneu par la caméra (cm)	40	65	102	(126)*
Position du pneu par CFO (cm)	40	70	94	129
Largeur de l'empreinte connue (cm)	24		24	
Largeur de l'empreinte par la caméra (cm)	25		(24)*	
Largeur de l'empreinte par CFO	30		40	
Delta temps excitation du capteur (ms)	87		163	
Delta temps à 10 % de la variation max de λ_{Bragg} (ms)	11		20	
Amplitude λ_{bmin} (nm)	-0,713		-0,445	
Amplitude λ_{bmax} (nm)	0,57		1,13	

()* Valeur estimée par la connaissance de la dimension de la surface de contact.

Tableau 10.3 – Relevé des mesures de CFO n°2 et de la caméra pour l'essieu avant lors des passages 14 et 19.

10.4.2.2 Les effets de l'essieu arrière sur le capteur optique

Les résultats de ces mesures sont présentés dans le tableau 10.4.

10 : Expérimentation des capteurs à réseaux de Bragg

Paramètres	Passage 19				Passage 14			
	pneu rive	rive axe	pneu axe	rive axe	pneu rive	rive axe	pneu axe	rive axe
Position du pneu par la caméra (cm)	22	48	65	(90)*	83	105	125	(150)*
Position du pneu par CFO (cm)	22	-	-	93	76	-	-	142
Largeur de l’empreinte connue (cm)	24		24		24		24	
Largeur de l’empreinte par la caméra (cm)	26		(25)*		22		(25)*	
Largeur de l’empreinte par CFO ($\lambda > 0,2nm$) (cm)	71				70			
Delta temps excitation du capteur (ms)	110				163			
Delta temps à 10 % de la variation max de λ_{Bragg} (ms)	12				20			
Amplitude λ_{bmin} (nm)	-0,938				-1,638			
Amplitude λ_{bmax} (nm)	0,884				1,226			

()* Valeur estimée par la connaissance de la dimension de la surface de contact.

Tableau 10.4 – Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l’essieu arrière lors des passages 19 (90 km/h) et 14 (50 km/h).

10.4.2.3 Bilan

Les positions externes des pneus ont été localisées à 7 cm près. La largeur des pneus l’est à 2 cm près. Pour ces deux passages, les deux pneus de l’essieu arrière sur le côté droit n’ont pas pu être correctement distingués contrairement au contour externe de l’ensemble des deux pneus. Ceci peut s’expliquer par la résine plus souple dans le capteur CFO n°2.

Les différentes vitesses sur le capteur engendrent bien une variation de la longueur d’onde dont la durée est variable. Une vitesse élevée entraîne un temps de passage sur le capteur plus faible qu’une vitesse plus faible. Le rapport des vitesses est de 1,8 entre un véhicule se déplaçant à 90 km/h et un autre circulant à 50 km/h. En examinant les temps mesurés à 10 % et reportés dans les deux tableaux précédents, le même rapport est observé. Les écarts de cette mesure à vitesse constante viennent probablement du véhicule qui ne possède pas de limiteur de vitesse. Ainsi, la vitesse donnée est une vitesse estimée par le conducteur au moment du passage. Cela explique la variation de la mesure du temps à 10 % (entre 11 et 12 ms pour les différents pneus et passages à 90 km/h). Des mesures complémentaires n’ont pas été effectuées à d’autres vitesses pour vérifier si cette règle s’appliquait toujours.

10.5 Bilan

Toutes ces mesures permettent de valider le fonctionnement de ce nouveau capteur à réseaux de Bragg en conditions réelles d'utilisation. Des mesures complémentaires sur des poids lourds pris au hasard dans la circulation sont présentées dans l'annexe D. Ce capteur détecte aisément les poids lourds. La validité des mesures après au moins dix mois d'installation montre qu'il peut servir dans ce genre d'application. Cependant, il n'est pas encore assez sensible pour repérer tous les véhicules légers en circulation.

D'après la répartition des réseaux de Bragg, une précision de 1,5 cm était attendue. La comparaison avec les mesures provenant de la caméra montre un écart de 7 cm au maximum. Ce capteur indiquerait également la largeur des pneus : une étude complémentaire validerait ces premiers résultats. Cette mesure est approximative et demande une analyse plus fine de l'évolution des signaux non conforme aux attentes théoriques (paragraphe 7.4.7, page 76). Cette disparité provient du milieu dans lequel les fibres sont noyées. L'homogénéité de la résine permettrait d'obtenir des mesures plus exploitables. La présence d'ornières conséquentes sur les voies de circulation est également un frein à la réalisation d'une mesure plus précise. Elle change la répartition de la masse et la profondeur d'enfouissement du capteur. Un modèle de déformation de la résine dans la chaussée aurait permis de les corriger.

Une variation significative est considérée à partir 0,2 nm. Cette valeur a été initialement choisie comme la moitié de la variation maximale des réseaux de Bragg. Dans nos différents passages, elle permet une estimation de la position des pneus ainsi que de leur largeur avec une erreur inférieure à 6 cm.

Les mesures de vitesse n'ont pas pu s'effectuer. En effet, l'interrogateur ne permet d'acquérir les données que d'un seul capteur. Ainsi, la mesure du temps de passage d'un véhicule entre deux capteurs n'a pu être réalisée. Par ailleurs la vitesse peut se calculer à partir du moment où la distance entre les deux fibres est connue. Le système d'acquisition doit récupérer l'ensemble des longueurs d'onde de Bragg tous les 60 μ s simultanément sur chaque fibre. Ce temps d'acquisition est valable pour deux fibres espacées de 2 mm et pour un véhicule circulant à une vitesse maximale de 30 m/s. Ainsi la distinction de l'approche du véhicule sur chaque fibre est visible, autorisant alors, en plus de la mesure de la position latérale, une mesure de vitesse avec un seul capteur. Notre système réalise une acquisition toutes les millisecondes. Ainsi, la vitesse d'un véhicule ne peut pas être mesurée à l'aide d'un seul capteur et l'interrogateur à réseau de Bragg.

Le temps de réponse de ce capteur seul est difficilement mesurable. En effet, le signal optique a une vitesse proche de la celle de la lumière. Le temps de réponse dépend donc de la capacité du réseau à se déformer lors d'une perturbation externe. Noyé dans de la résine, son temps de réponse est au moins équivalent à celui du capteur résistif noyé dans la même substance (paragraphe 11.3.1 page 156).

11.

Expérimentation des capteurs résistifs innovants

11.1 Les tests en laboratoire

La réponse à une perturbation brève a été testée. L'impact d'un coup de marteau sur le capteur vérifie la réponse du capteur à une pression extérieure. En effet, le tube doit pouvoir se déformer et revenir à son état initial avant que l'essieu suivant passe sur le capteur. Dans le cas contraire, le capteur ne détecte pas le passage de l'essieu suivant. Un temps de réponse d'une dizaine de microsecondes a été observé à l'oscilloscope.

Pour valider le système dans le cadre de cette application routière, le capteur a été installé dans une zone dégagée, à savoir le parking du laboratoire, pour permettre à une voiture de circuler dessus sans encombre. Un système d'attache le relie à la plateforme de test pour éviter son déplacement lors du passage du véhicule. La voiture de test a été utilisée durant ces expérimentations.

Temps (hh :mm :ss :dc)	Position (cm)
03 :05 :24 :06	177,8
03 :05 :24 :42	181,2

Tableau 11.1 – Relevé des positions par la carte d'acquisition électronique lors du second passage.

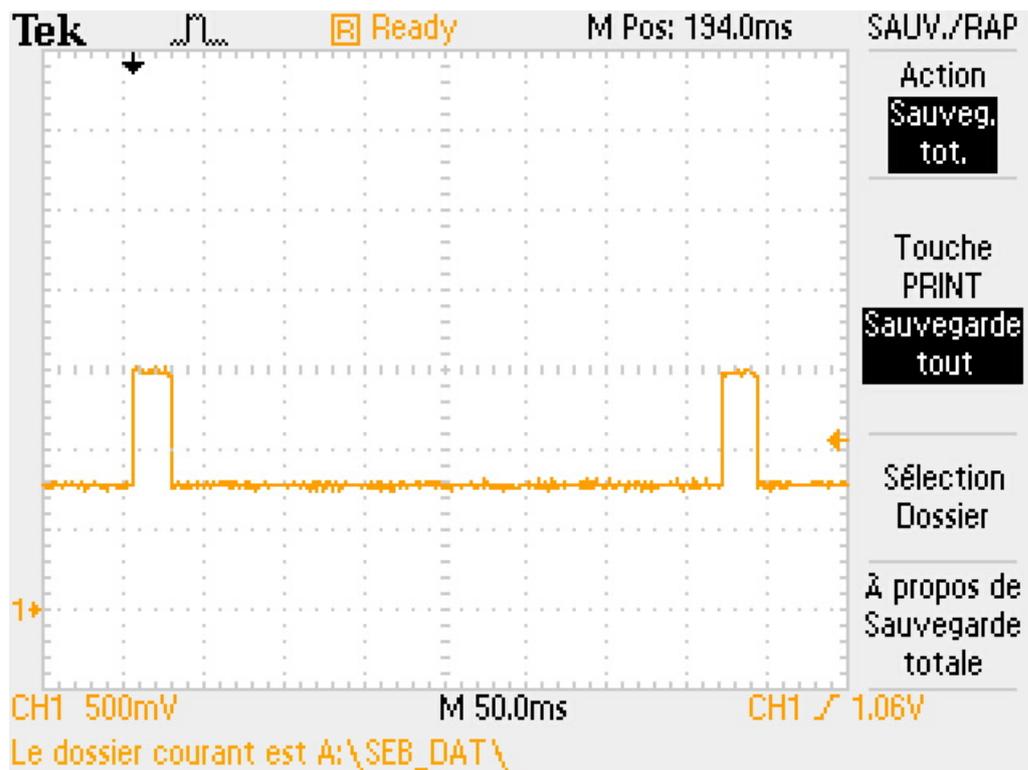


FIGURE 11.1 – Acquisition du signal électrique en sortie de l'électronique de conditionnement avec l'oscilloscope numérique lors d'un passage à 30 km/h de la voiture de test et à une position de 1,70 m par rapport au repère de référence du capteur.

Le système d'acquisition a relevé une position terminale à 299 cm, valeur cohérente par rapport à la longueur de 3 m du capteur. Le temps entre le passage de deux essieux est de 0,36 ms. Sachant que 2,58 m les séparent (paragraphe 9.4 page 123, la vitesse du véhicule est de 7,16 m/s soit 26 km/h. Lors de ce passage, le conducteur a relevé une vitesse de 30 km/h. 10 cm séparent la position visée par le conducteur de la position mesurée par le capteur. Cependant, aucun relevé de référence ne permet d'affirmer que le conducteur est bien passé à 170 cm. Les résultats obtenus sont semblables à ceux attendus (paragraphe 8.6 page 114. La forme en créneaux réguliers est bien observée. Par ailleurs, les relevés de tension de la figure 11.1 correspondent bien aux mesures de la carte électronique (correspondance tension - position donnée par l'équation 8.1.

Lors d'un autre test, le conducteur souhaite rouler sur le capteur à une position de 60 cm. Le système d'acquisition a relevé les positions suivantes :

Temps (hh :mm :ss :dc)	Position (cm)
03 :08 :53 :27	62,3
03 :08 :53 :30	210,5
03 :08 :53 :66	67,2
03 :08 :53 :68	208,5
03 :08 :53 :69	239,7

Tableau 11.2 – Relevé des positions par la carte d’acquisition électronique lors du second passage.

Un oscilloscope a relevé le signal présenté sur la figure 11.2.

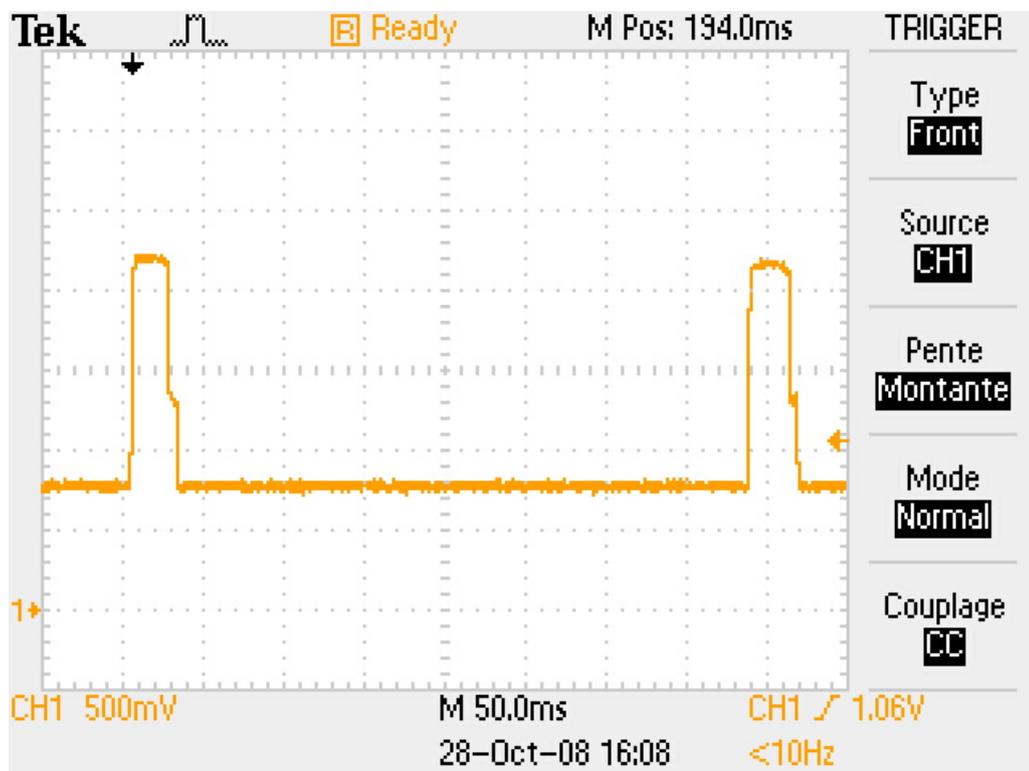


FIGURE 11.2 – Acquisition lors d’un passage de la voiture de test sur le capteur à 30 km/h à une position latérale de 60 cm mesurée à l’oscilloscope numérique.

Ces résultats révèlent une particularité. Pour chaque essieu, deux paliers sont relevés : un premier palier vers les 60 cm suivi d’un second au delà des 210 cm. Cette configuration laisse supposer que l’axe sur lequel avance le véhicule n’est pas perpendiculaire à l’axe du capteur. Le premier pneu occulte la mesure du second pneu tant que celui-ci est présent sur le capteur. Si ce premier pneu n’est plus en contact avec le capteur mais que le second l’est toujours, alors le système d’acquisition mesure la position du second. Cette observation est plus approfondie dans le paragraphe 11.2.

En considérant une vitesse de 35 km /h, un point du pneu reste en contact avec le sol pendant 18,5 ms pour un véhicule ayant une longueur de l’empreinte de son pneu de 18 cm dans le

sens de l'avancement du véhicule. La figure 11.3 représente les valeurs relevées par le système d'acquisition sans qu'une moyenne des valeurs ait été effectuée. Le temps d'échantillonnage est de 0,7 ms. La comparaison entre les courbes de la figure 11.4 et de la figure 11.3 souligne que l'acquisition effectuée par la carte électronique et celle effectuée par l'oscilloscope sont semblables.

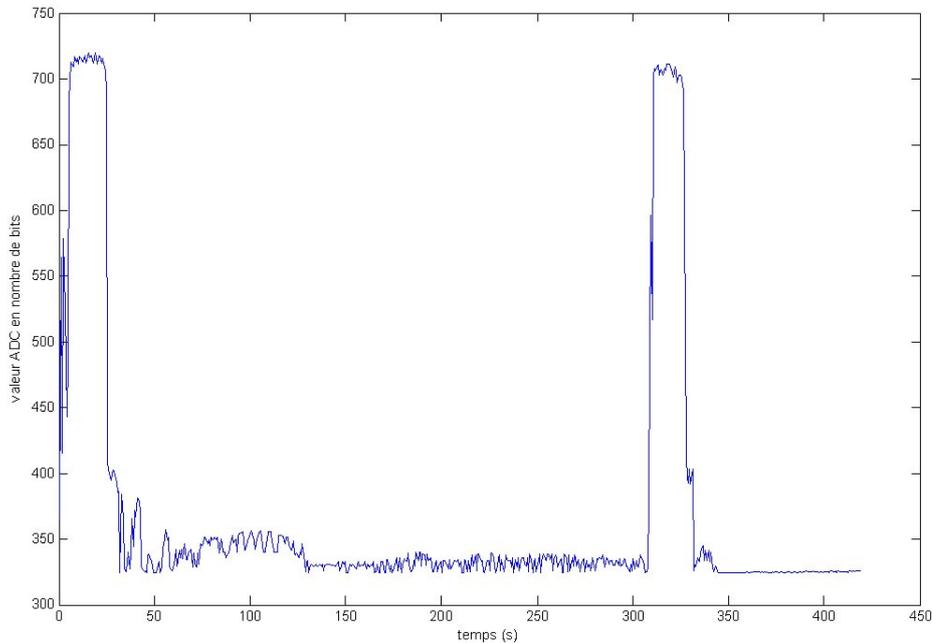


FIGURE 11.3 – Acquisition lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur à 35 km/h à une position latérale de 1,10 m avec le système d'acquisition.

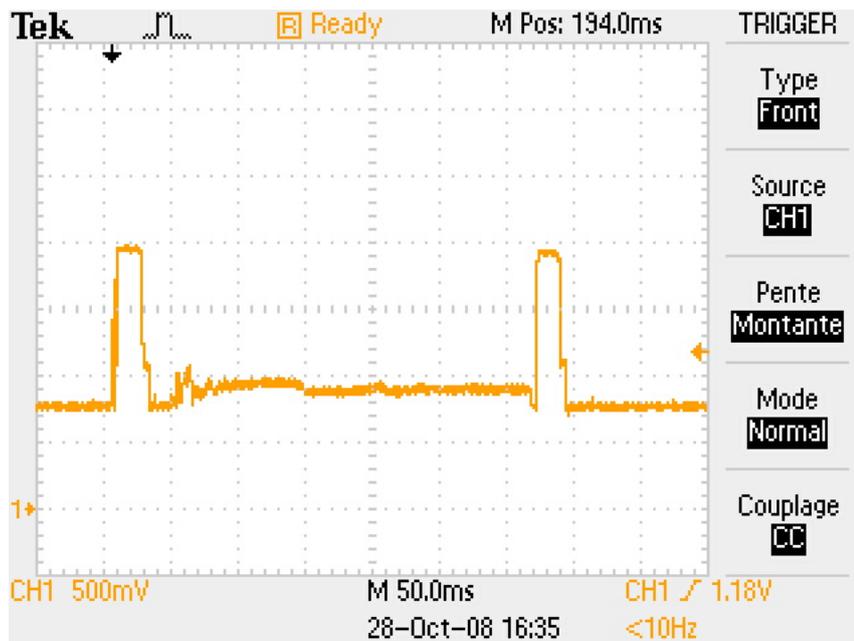


FIGURE 11.4 – Acquisition lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur à 35 km/h avec un oscilloscope numérique.

Le système d'acquisition donne une position pour le premier essieu à 103 cm. L'essieu arrière est positionné à 106 cm. La position visée par le conducteur est de 110 cm, néanmoins ce paramètre n'a pas pu être validé par un autre instrument. Ces figures présentent un temps de montée instantané par rapport au temps de descente. En effet, la courbe comporte un palier intermédiaire pendant le temps de descente, lié à la direction de la voiture qui n'est pas parfaitement perpendiculaire à l'axe du capteur. Ce phénomène est mis en avant dans le paragraphe 11.2.

En complément de ces expériences, des tests succincts à vitesse réduite (< 20 km/h) et mesurés à l'ohmmètre ont été effectués pour vérifier la bonne réponse du capteur suite au passage de la voiture de test. Ces résultats confirment les valeurs obtenues lors de l'application d'une pression exercée par une pince (paragraphe 8.3).

11.2 Influence de l'angle d'attaque sur le capteur

Pour le moment, les études précédentes ont toujours été menées en considérant que le véhicule arrive perpendiculairement par rapport à son axe de déplacement. Cependant, le véhicule peut très bien traverser le capteur avec un autre angle soit parce que le capteur a volontairement été positionné avec un certain angle soit parce que le véhicule ne possède pas une trajectoire linéaire et parallèle à l'axe de la route.

La figure 11.5 représente un exemple d'approche d'un véhicule lambda sur un capteur. Sa trajectoire est supposée parallèle à l'axe y .

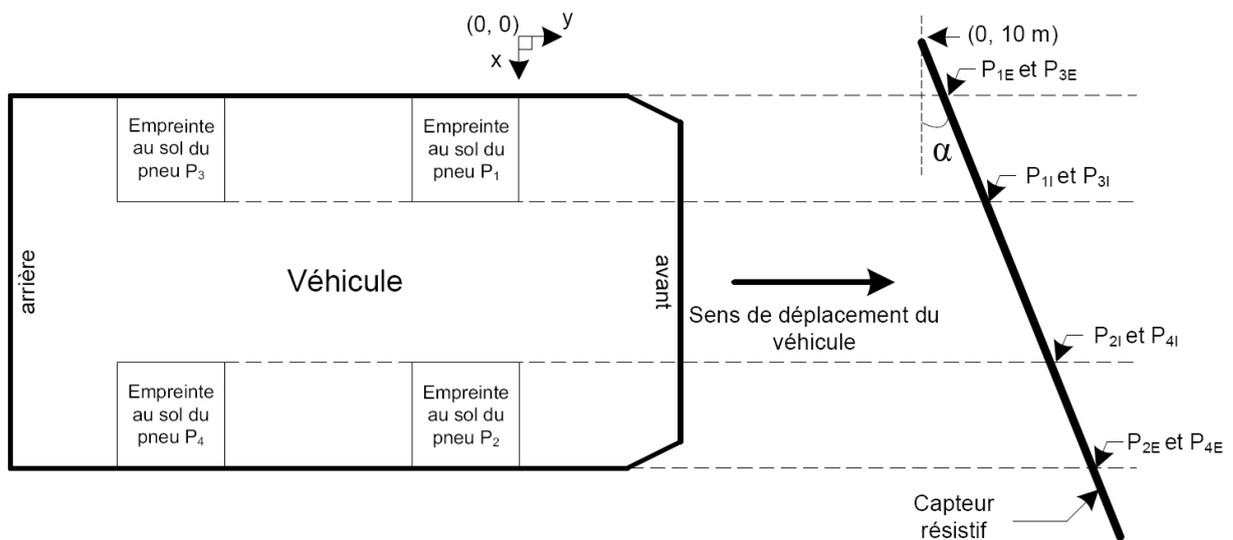


FIGURE 11.5 – Approche du véhicule sur le capteur suivant un angle α .

Une simulation sous Matlab[®] a été réalisée afin d'observer pour un seul essieu l'influence de l'angle d'attaque du véhicule sur la position mesurée par le capteur. Pour cette simulation,

l'essieu utilisé est celui du véhicule de test à savoir, une Renault-Megane. Sans sollicitation extérieure, le capteur mesure une distance de 3 m, position maximale que peut enregistrer le capteur. Les paramètres de simulation sont les suivants :

- une période d'échantillonnage de 0,1 ms ;
- des coordonnées de départ pour le capteur de (0, 10 m), figure 11.6 ;
- P_{1E} , abscisse de 0,6 m ;
- l'avant de l'empreinte du pneu positionnée à une abscisse de 0,6 m et à une ordonnée de 0 m ;
- les angles d'attaque de 0° , 1° , 5° , 10° ;
- une vitesse de 25 m/s.

Quand le véhicule roule sur le capteur, il raccourcit sa résistance, enregistrant une position plus faible. Comme le montre la figure 11.6, lors du passage du véhicule sur le capteur, une diminution brutale de la position mesurée est visible. Tant que la totalité du pneu le plus proche de l'abscisse 0 est présente sur le capteur, la position reste constante (courbe en bleu, trait continu). Quand elle ne l'est plus, la position remonte linéairement. Dès que le pneu n'est plus en contact avec le capteur, la position revient à sa valeur de repos, sauf si un angle d'inclinaison du capteur existe. Le même phénomène se produit pour l'autre pneu. Selon l'angle, il est plus ou moins visible comme le montre la figure 11.7

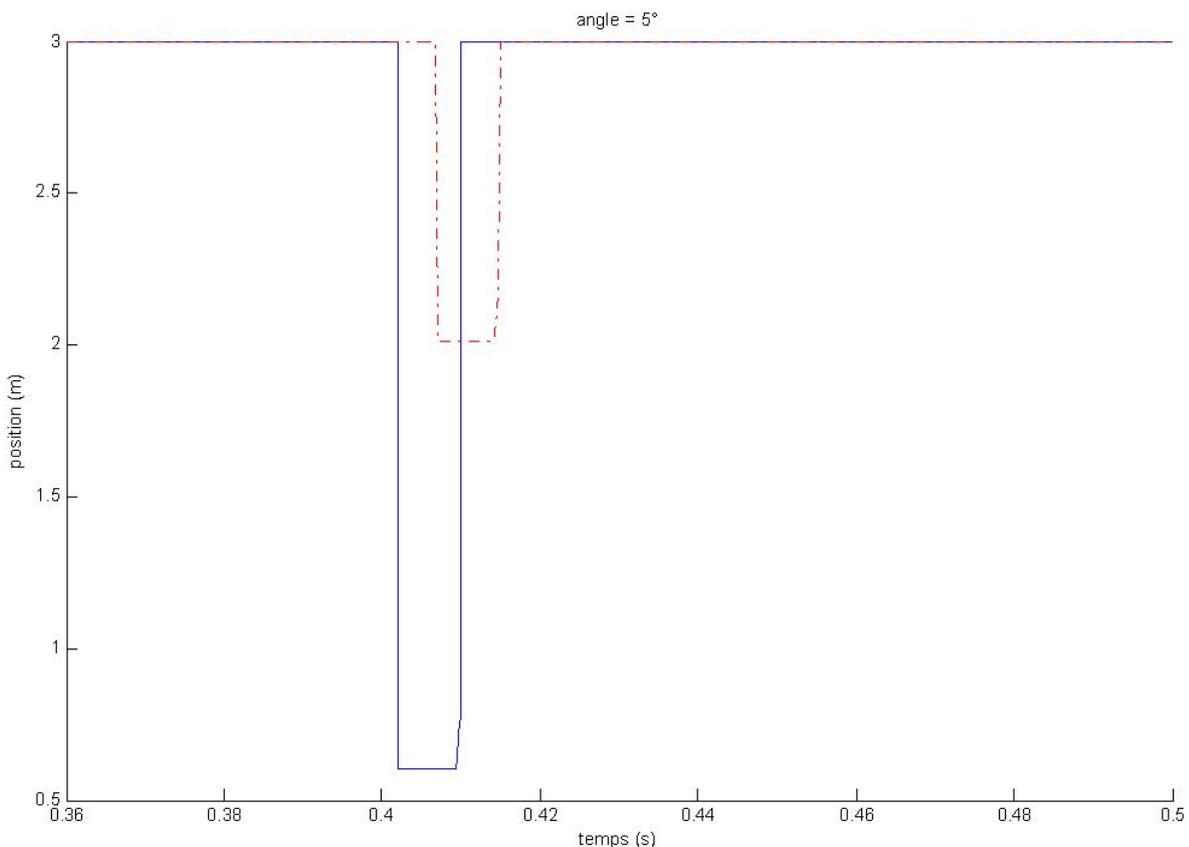


FIGURE 11.6 – Evolution de la position de chaque pneu séparément en fonction du temps ; En bleu trait continu : l'empreinte de P1 et en rouge trait discontinu : l'empreinte de P2 (schéma 11.5).

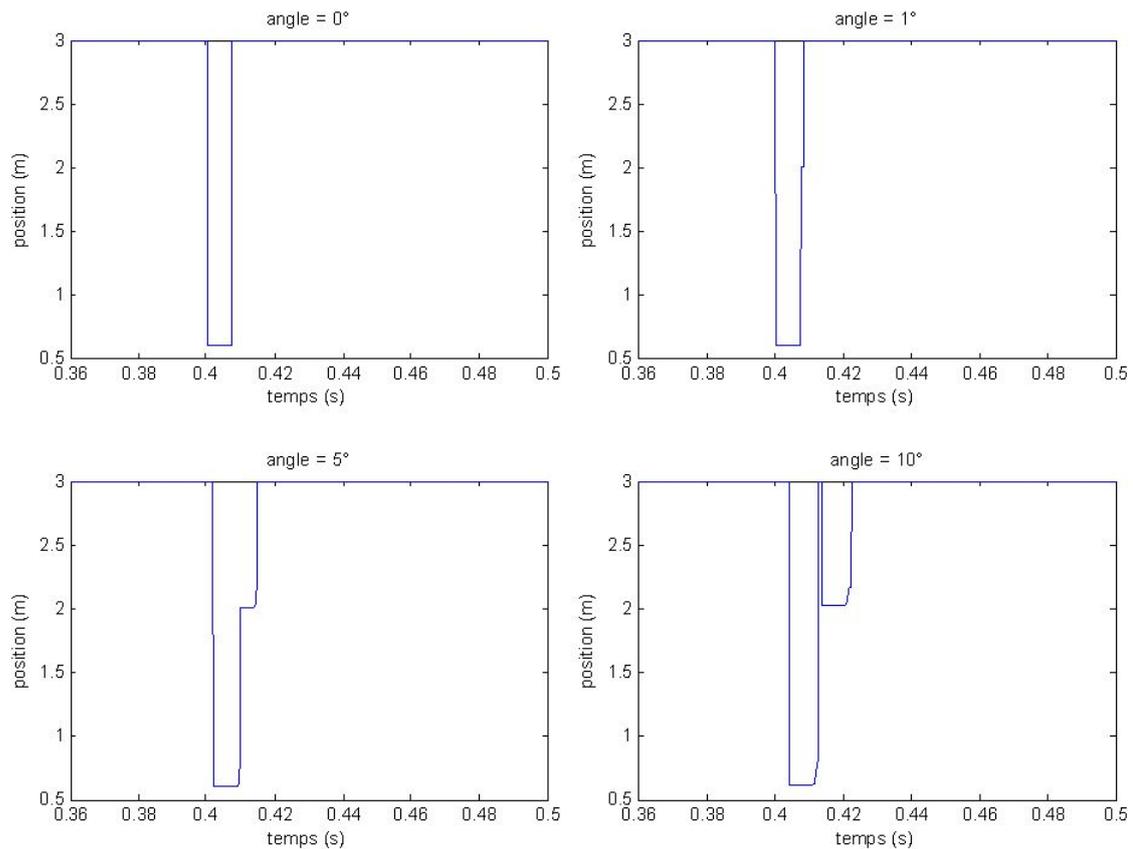


FIGURE 11.7 – Évolution de la position de l'essieu avant du véhicule de test en fonction du temps pour plusieurs configurations d'angle d'inclinaison du capteur.

Pour cette voiture, à partir d'un angle d'inclinaison du capteur de $8,8^\circ$, le pneu droit n'est plus confondu avec le pneu gauche. Ils sont vus indépendamment l'un de l'autre par le capteur. La simulation n'a pas pris en compte l'essieu arrière. Il se peut alors que pour un angle donné, le pneu arrière gauche masque le pneu avant droit. Dans le cas d'un angle négatif, l'opération inverse se produit à savoir le pneu le plus éloigné du zéro du capteur est d'abord détecté, puis c'est le pneu le plus près du zéro qui prend le relais. Afin de différencier l'essieu avant de l'essieu arrière, l'angle d'approche pour le véhicule de test doit être inférieur à $56,5^\circ$. Cependant, cet angle influe sur la longueur du capteur. En effet, plus l'angle d'approche est important et plus la longueur du capteur pour couvrir la largeur d'une voie de circulation est grande.

Ces résultats sont également valables si le capteur est positionné parallèlement à l'axe des abscisses et que le véhicule possède un angle d'approche différent de 0. Il suffit d'effectuer une rotation du repère à l'aide d'une simple matrice de rotation. Cette opération est couramment utilisée en robotique [Khalil et Dombre, 1999].

11.3 L'expérimentation sur une route départementale

11.3.1 Les tests préalables

Le capteur testé sur site est conditionné dans de la résine (paragraphe 9.2.2 page 121). Pour valider son fonctionnement sur site, des plaques de test ont été conçues pour reproduire en laboratoire un morceau de chaussée.

Le premier test a consisté à vérifier la réponse mécanique du capteur et de son conditionnement suite à un impact. L'expérience du paragraphe 8.6 page 114 a été reproduite. La figure 8.6 expose ces résultats.



FIGURE 11.8 – Temps de réponse mécanique du capteur résistif conditionné dans de la résine mesuré à l'aide d'un oscilloscope numérique avec à gauche une sollicitation réalisée par une massette, au centre un zoom sur la transition descendante et à droite une sollicitation réalisée avec un maillet.

Le capteur a été inséré sur une plaque de test dans de la résine. L'installation est identique à celle effectuée sur le site (paragraphe 9.2.2 page 121). Le capteur a subi deux types d'impulsions différentes.

La première est réalisée avec une massette de 1,5 kg. Un coup bref est porté sur le capteur. Le résultat est visible sur la capture de l'écran de l'oscilloscope à gauche sur la figure 11.8. La capture, au centre, est un zoom sur la transition descendante. 150 μs sont nécessaires pour que le signal se stabilise. La réponse correspond, comme dans le cas sans résine, à une réponse du premier ordre.

La deuxième utilise un maillet en caoutchouc de 150 g environ. La réponse, suite à une excitation brève du système par l'intermédiaire d'un coup est montrée à droite de la figure 11.8. 40 μs sont nécessaires au signal pour s'établir. Le maillet, plus léger, est plus facilement maniable. Ainsi, le coup exercé est plus bref expliquant la différence du temps de réponse entre une massette et un maillet.

Même si l'allure de l'excitation n'a pu être établie par l'usage d'un marteau de choc, ces valeurs sont compatibles avec le temps de réponse exigé par les contraintes liées à l'application, c'est-à-dire à un temps de réponse inférieur à la milliseconde (paragraphe 6.2 page 56).

11.3.2 Le recueil des données

Le système d'acquisition recueille des données toutes les millisecondes. Elles sont transmises suivant le protocole *Controller Area Network (CAN)* vers un superviseur (figure 11.9). L'algorithme développé regroupe les valeurs mesurées du Convertisseur Analogique Numérique (CAN) par zone. Le début et l'arrêt d'une zone sont conditionnés par l'écart maximal autorisé entre deux mesures successives. Ce sont ces zones horodatées qui sont envoyées au superviseur. Une zone contient la somme des valeurs mesurées, le nombre de valeurs enregistrées et la date indiquant l'heure de la première valeur.

Chaque jour, à heure fixe, le superviseur envoie sur un serveur FTP distant, les données de la journée précédente et les archive sur son système, figure 11.9. Une liaison GPRS a été installée afin de lui donner accès à Internet. Le superviseur se sert également de ce réseau pour se connecter à un serveur de temps. Après sa synchronisation, il transmet son heure pour que toutes les cartes électroniques soient synchrones à leur tour.

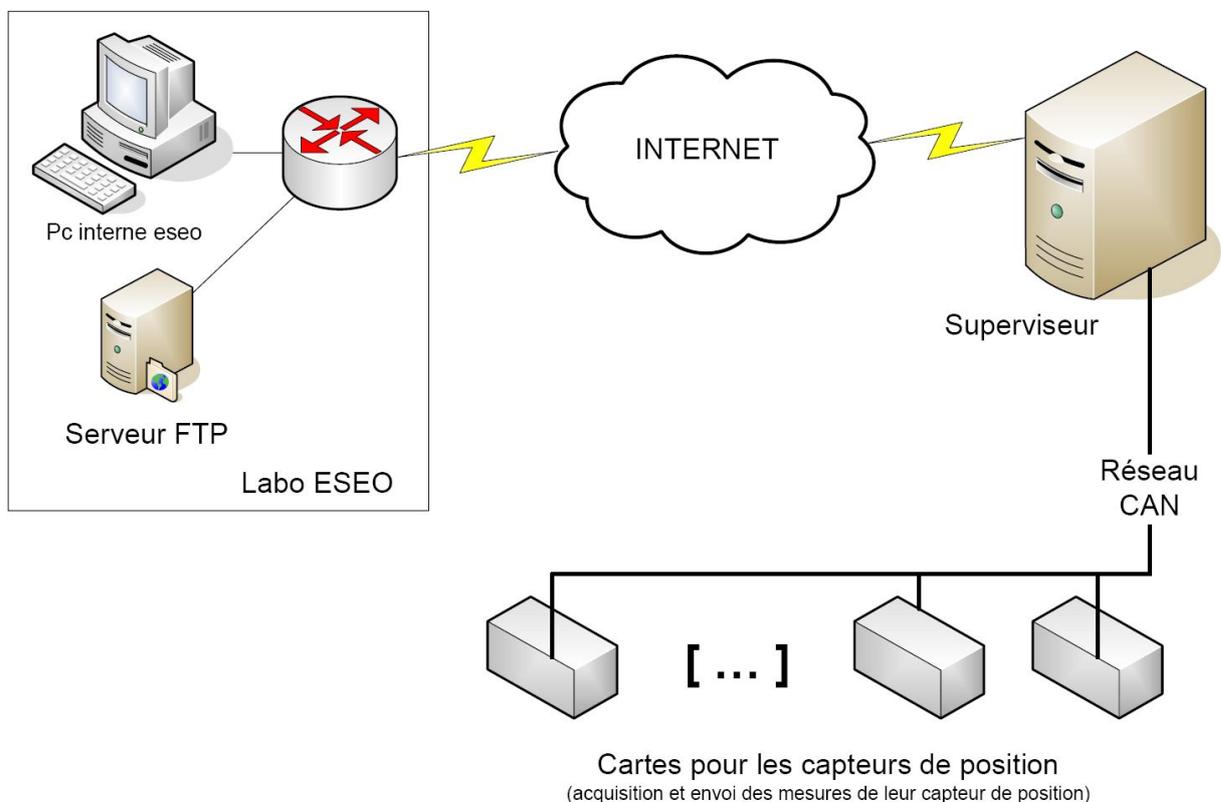


FIGURE 11.9 – Topologie du réseau sur le site de Marans.

11.3.3 Les résultats

Le système électronique étant installé en bord de voie, le pneu avant droit est le pneu le plus proche de l'origine du capteur, c'est-à-dire de la position 0. La position visée par le conducteur n'est validée par aucun autre appareil. C'est donc une position estimée.

Le tableau 11.3 montre un aperçu des acquisitions reçues sur le superviseur pour le capteur résistif n°22. Le véhicule de test passe à une position repérée sur le capteur de 60 cm environ à 70 km/h environ. Les mesures sont prises ici toutes les 0,5 ms. L'origine du repère est placée à la jonction entre la chaussée et la rive.

Temps (hh :mm :ss :dc)	Position (cm)	Nb de mesures
03 :02 :53 :84	280,0	3
03 :02 :53 :84	276,5	3
03 :02 :53 :84	230,0	12
03 :02 :53 :85	276,8	6
03 :02 :53 :96	269,7	7
03 :02 :53 :97	236,5	9
03 :02 :53 :97	234,9	5
03 :02 :53 :84	277,3	11

Tableau 11.3 – Relevé des positions par la carte d'acquisition électronique lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur 22.

Il apparaît que seul le pneu avant gauche est visible par le capteur. Par rapport à la surface de la chaussée, ce dernier n'est pas disposé partout à la même hauteur. Cela explique que le système détecte une position éloignée correspondant à la mesure du deuxième pneu.

Cette version présente un défaut majeur. Après quelques semaines d'installation, le système d'acquisition mesure en permanence des signaux similaires à ceux présentés dans le tableau 11.4 sans qu'aucun véhicule ne circule dessus. Les causes de cette incohérence dans le relevé des mesures provient d'une détérioration de la peinture présente à l'intérieur du tube suite aux contacts répétés de celle-ci avec la tige filetée. La deuxième cause est due à la perte ponctuelle des connexions physiques entre les conducteurs électriques engendrée par les vibrations des matériaux suite aux passages des véhicules.

Temps (hhmmssdc)	Position (cm)
16551474	0,3
16551495	32,7
16551496	46,4
16551503	0,3
16551510	90,4
16551511	0,6
16551511	264,1
16551511	95,9
16551785	40,9
16551785	26,7

Tableau 11.4 – Relevé de positions incohérentes par le système d’acquisition électronique.

D’autres inconvénients ont été constatés. En effet, après plusieurs mois d’utilisation, la tige filetée s’est allongée d’au moins 5 % poussant la résine jusqu’à ce qu’elle ressorte en surface (figure en annexe E.9). Par ailleurs, l’installation du capteur à quelques millimètres au-dessus de la surface de la chaussée engendre un bruit lors du passage des véhicules.

11.4 Le capteur résistif amélioré

Cette seconde version du capteur a pour but d’améliorer les inconvénients majeurs de la première :

- le non enfouissement complet du capteur dans la chaussée ;
- la dégradation de la peinture ;
- l’allongement du capteur.

Un véhicule d’une tonne reposant sur quatre roues exerce une contrainte sur son support d’environ 73 kN/m², la surface d’appui d’une roue étant de 0,18 m × 0,19 m. Pour une profondeur donnée, plus la contrainte est exercée loin de la surface et plus le matériau se déforme (loi de Boussinesq [Doré, 2007]). Une chaussée peut voir sa structure se déformer de 50 à 300 microns. Des recherches ont donc été menées pour rapprocher le fils résistif du conducteur à une distance de quelques centaines de micromètres.

Le matériau conditionnant le capteur étant de la résine plus souple que l’enrobé, il faut alors trouver le moyen d’utiliser directement la résine comme capteur. La résine conductrice n’existait pas, elle a été recouverte de la peinture conductrice utilisée préalablement. En posant la tige filetée directement sur cette résine, un écart de moins de 0,4 mm est observé. La résine plus souple doit permettre de compenser l’écart nécessaire. Pour éviter une dégradation prématurée

de la peinture, un primaire d'adhérence a été appliqué afin de renforcer la tenue de la peinture sur la résine.

L'ensemble du dispositif est installé afin d'avoir le haut de la tige filetée à moins de 5 mm sous la surface de la chaussée. La création de cette version améliorée repose sur une préparation identique aux premières étapes réalisées lors du conditionnement du capteur optique à réseaux de Bragg. De plus, elle permet une meilleure répétabilité lors de la fabrication du conducteur de retour. Le tube étant enduit de peinture par coulage, des zones non recouvertes apparaissent parfois.

Cette version améliorée (V2) a été testée sur le site de Marans. Quand elle affleure à la surface de la chaussée, une usure est alors relevée au bout de quelques semaines (figure E.11 en annexe E). Installé plus en profondeur, le capteur conditionné dans plus de résine devient trop rigide. Par conséquent, il ne détecte plus correctement les différentes voitures.

Le tableau 11.5 présente les résultats obtenus suite à des allers et retours sur le capteur n°24. Ces mesures ont été prises sur le site lors des premiers tests avec cette deuxième version du capteur. La roue droite du véhicule passent selon différentes positions sur celui-ci : 30 cm, 70 cm et 140 cm. La vitesse n'est pas connue. En plus des positions situées à 30 cm et 70 cm, le capteur en a relevé d'autres (en italique) alors que le véhicule n'a pas roulé dessus. Les autres valeurs sont cohérentes. Néanmoins, les positions visées par le conducteur n'ont pas été vérifiées par un autre système de mesure.

Temps (hhmmssdc)	Position (cm)
03005268	34,8
03005269	33,5
03005312	36,5
03005318	37,1
03005363	154,7
03005466	<i>152,8</i>
03005516	<i>152,9</i>
03010368	<i>176,8</i>
03012253	67,8
03012272	61,1
03012277	70,3
03012337	65,9
03014076	139,0
03014082	118,0

Tableau 11.5 – Relevé de positions par le système d'acquisition électronique suite à des allers et retours de la voiture de test sur le second capteur résistif (n°24).

Un exemple de la signature d'un camion à quatre essieux sur le capteur 22, une semaine après l'installation de la deuxième version est présenté sur la figure 11.10, Tech = 0,7 ms.

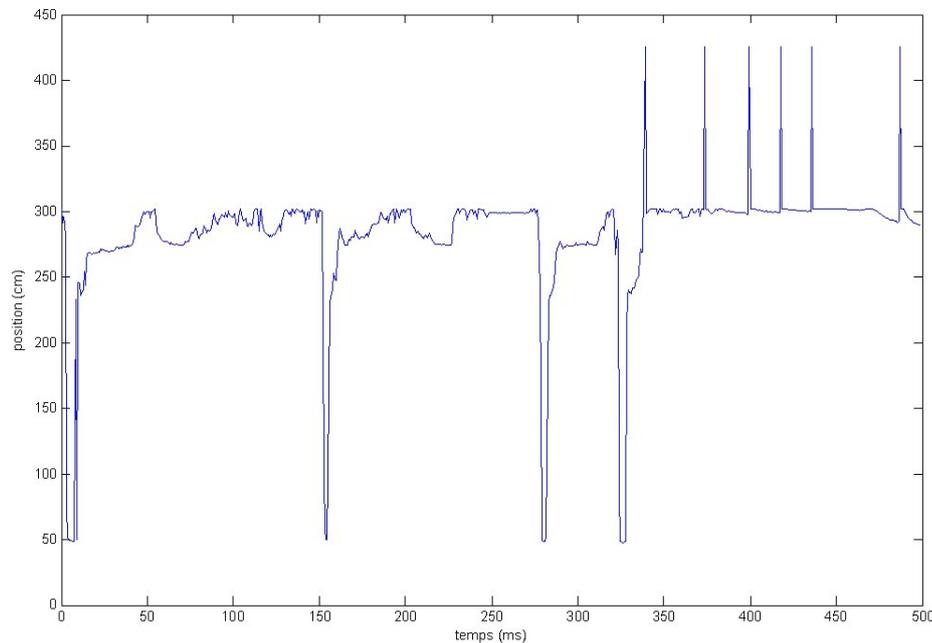


FIGURE 11.10 – Signature d'un camion sur le capteur n°22.

Au repos, le capteur indique 300 cm environ, soit sa longueur totale. Les pics au delà de 300 cm montrent une déconnexion physique de l'extrémité du capteur, due aux vibrations. Les différents essieux sont positionnés dans l'ordre à 48 cm, 49 cm, 48 cm et 48 cm.

Les boucles indiquent que le camion se situe à 10 cm vers la rive, l'origine de la mesure étant prise au centre de la voie (mesure à 10 cm près). En corrélant les deux informations, le camion doit avoir une largeur de 1,80 m, ce qui semble peu probable. Même si le capteur a correctement détecté le camion, une zone est visiblement masquée, due à une profondeur différente sur l'ensemble du capteur. La présence de résine plus ou moins épaisse engendre des zones mortes.

Cette deuxième version est également protégée par le brevet [\[Plainchault et Aubin, 2009\]](#).

11.5 Bilan

Le capteur ne peut être considéré comme aussi précis que celui testé en laboratoire. Un autre dispositif doit être utilisé pour confirmer la position du véhicule indiquée par le capteur. Des données aléatoires mesurées par le capteur ne permettent pas d'être certain de la présence d'un véhicule. Le juste équilibre entre profondeur et sensibilité du capteur n'a pas encore été trouvé. Un modèle de déformation des matériaux conditionné dans de la résine doit permettre d'affiner les paramètres d'ajustement du capteur vis-à-vis de la profondeur d'enfouissement, de la distance nécessaire entre la tige filetée et le support du conducteur.

L'installation sur site a révélé un allongement du capteur suite aux nombreux passages des véhicules. Plus exactement, c'est la tige filetée qui s'agrandit comme le montre la figure E.9.

Le passage d'un véhicule instrument sur le site n'a pu être fait avant la détérioration des capteurs. Ainsi les mesures prises sur site n'ont pas fait l'objet d'une contre-mesure par un capteur différent.

Conclusion

12.

Bilan

L'objectif de ces travaux était de créer et de tester de nouveaux capteurs de position de véhicules avec la valeur de la précision inférieure à celle obtenue avec les capteurs actuels (10 cm). Deux capteurs innovants à contact ont émergé de ces recherches.

Le premier utilise une technologie à base de fibres optiques sur lesquelles plusieurs réseaux de Bragg sont photo-inscrits. Chaque réseau joue le rôle d'un point de mesure sur le capteur. Plus la juxtaposition générale des réseaux est proche, plus le Capteur à Fibres Optiques (CFO) est précis, dans notre cas, tous les 1,5 cm. Le deuxième s'appuie sur la variation d'une résistance proportionnelle à la position du point de contact. Les premiers tests ont permis de démontrer la sensibilité de détection de ces deux capteurs : un piéton ou une bicyclette sont tout aussi bien détectés qu'un véhicule circulant sur ces capteurs posés à même le sol.

Deux capteurs espacés d'une distance connue permettent d'obtenir la vitesse de déplacement d'un objet. Cette distance doit être dimensionnée pour que sa vitesse soit considérée comme constante entre les deux capteurs.

Plusieurs contraintes initialement définies, notamment l'aspect non intrusif du capteur pour le conducteur, nous ont incités à les noyer dans la chaussée. Leur longueur est fixée suivant les besoins de l'utilisateur. Leur largeur et leur épaisseur n'excèdent pas, dans les deux cas, un centimètre. Pour des raisons de coût, le capteur optique possède une zone sensible de 1,44 m et une configuration permettant d'atteindre théoriquement une précision de 1,5 cm.

Pour démontrer leur efficacité, ils ont été testés en laboratoire puis sur une route départementale (RD 961) dans le Maine-et-Loire (49). Peu encombrant et facilement intégrable dans l'enrobé de la route, ils peuvent être de configuration variée (forme linéaire, spirale...). Dans cette étude, ils ont été positionnés en majorité linéairement et perpendiculairement à l'axe d'avancement des véhicules, noyés grâce à de la résine spéciale à moins d'un centimètre de profondeur. Cette profondeur d'enfouissement influe sur sa sensibilité. Les résultats obtenus sur une route présentant un fort orniérage ne seront pas les mêmes que sur une nouvelle route n'en présentant pas. Les véhicules sont plus ou moins bien détectés.

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau 12.1

Capteur	CFO à réseaux de Bragg	Capteur résistif	Boucles électromagnétiques
Erreur sur la mesure de position	5 - 7 cm uniquement sur camion	5 cm (1,1 cm en laboratoire avec un ohmmètre)	10 cm (deux boucles décalées)
Mesure de la vitesse	Oui (théoriquement possible avec un seul capteur)	Oui (avec deux capteurs)	Oui, 5 %
Insensibilité météorologique	Oui	Oui	Oui
Coût matériel	+++++	+	+++
Coût d'installation	++	++	+++
Résistance sur le long terme	++ (+++++ possible, mais pas encore testé sur plus de dix mois)	Non significatif, en cours d'amélioration	+++++
Encombrement	+	+	++++
Etat de développement	Prototype	Prototype	Commercial

Tableau 12.1 – Bilan des deux capteurs développés comparés avec les boucles électromagnétiques

L'incertitude de la mesure prise par sur le capteur résistif avec la carte électronique est à majorer d'un centimètre sur une gamme de température allant de 7,6 °C à 42,4 °C. Bien que les mesures ne soient pas aussi précises que celle souhaitée dans le cahier des charges, ces deux capteurs se révèlent plus précis que les capteurs actuels.

Pour le capteur à réseaux de Bragg, la précision obtenue sur la mesure de position d'un poids lourd n'excède pas $\pm 3,5$ cm. Ce capteur a résisté à plus de 600 000 passages de véhicule. En mai 2009, le capteur est toujours opérationnel, soit dix mois après sa pose. La pose du capteur sous un manège de fatigue¹ permettrait de connaître plus facilement sa durée de vie sans attendre plusieurs années de service sur une route. L'utilisation de capteurs à fibres optiques induit des avantages notoires malgré un coût restant élevé. Théoriquement la mesure du poids des véhicules est possible mais elle n'a pas été validée. Une meilleure connaissance des propriétés de la résine est nécessaire, aussi bien en terme mécanique qu'en terme de variation de température. Toutes les configurations météorologiques n'ont pas été testées, les expériences ayant été réalisées de jour par temps sec ou légèrement pluvieux (< 3 mm). La vérification de la défor-

1. Dispositif tournant qui entraîne un essieu chargé d'une masse non négligeable pour tester l'endurance des enrobés.

mation de la résine par des températures inférieures à 10 °C n'a pas été effectuée. En affinant le procédé de fabrication du capteur, une meilleure précision peut facilement être obtenue.

95 % des mesures effectuées en laboratoire avec le capteur résistif associé à son système d'acquisition dédié et son modèle de régression linéaire donné par l'équation 8.1, affichent une précision de $\pm 1,2$ cm à 25 °C. Elle reste bornée à $\pm 2,5$ cm. Si la température du capteur varie de -15 °C à +80 °C, l'erreur de mesure supplémentaire est d'environ un centimètre. Elle peut cependant être corrigée en utilisant l'équation 8.21. Si la température de la carte d'acquisition et du capteur varie de $\pm 17,4$ °C, une erreur maximale de mesure d'un centimètre apparaît. Sur la plage des températures comprises entre -15 °C et +80 °C, l'erreur de mesure est assurée à moins de 3 cm.

Le capteur à réseaux de Bragg est insensible à la température dans la mesure où un calibrage régulier des longueurs d'onde de Bragg de référence assure sa non dérive. Sans ce calibrage régulier, il est quand même possible de déterminer la position des véhicules dans la mesure où l'ensemble des longueurs d'onde des réseaux sont mesurées. Néanmoins cette procédure s'effectue de manière simple en même temps que la détection de la variation des longueurs d'onde, sans intervention d'un opérateur extérieur. La température agit de manière homogène sur le capteur, entraînant une variation de la longueur d'onde identique sur les réseaux. Les précautions prises sur le site vis-à-vis du capteur résistif et de son conditionnement mécanique (résine) ne se sont pas révélées suffisamment efficaces pour protéger correctement le capteur (version 1) ou pour le rendre suffisamment sensible (version 2 du capteur). Les tests en laboratoire sur des plates-formes d'expérimentations n'ont pas donné le même résultat que les implantations sur la route.

Ces deux versions du capteur résistif utilisent une tige filetée qui est trop rigide. En effet, les fortes contraintes exercées par les véhicules la déforme. Pour la première version, deux ou trois mois ont suffi pour qu'elle sorte par une extrémité du tube dans lequel elle était insérée. Les premières dégradations concernant la seconde version sont apparus au bout d'un an. Des améliorations sont possibles pour détecter l'extérieur du pneu droit et gauche en conservant la même électronique.

Les deux capteurs sont posés perpendiculairement à la direction de circulation des véhicules. Par cette disposition, le capteur résistif mesure uniquement la limite externe du pneu droit, c'est-à-dire celui qui est le plus proche du bas-côté. Pour connaître la largeur du véhicule, certains capteurs ont été placés avec un angle de 30° par rapport à l'axe de direction de circulation des voitures tandis que d'autres restent perpendiculaires à ce même axe. Ce dispositif permet de connaître d'une part la largeur du véhicule, et d'autre part sa position latérale. Il distingue les différents pneus même si ces derniers sont proches l'un de l'autre. Le capteur optique repère toutes les contraintes présentes au-dessus de lui. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de l'incliner pour observer la localisation des pneus ainsi que leur taille. Ces deux capteurs innovants ont l'avantage d'être étanche grâce à la résine. Ils sont aussi insensibles aux conditions météorologiques et à un milieu électromagnétique perturbé.

Le capteur résistif fournit une position latérale de l'extrémité du véhicule côté passager par rapport à la rive de la chaussée. La position longitudinale est donnée lors de l'installation du système. Sans amélioration, l'installation de ce capteur n'est pas pertinente dans le cadre d'une application routière. Cependant son utilisation dans d'autres cadres d'utilisation n'est pas à exclure.

Sur une route départementale dont le marquage côté rive n'est pas clairement défini, il est préférable de prendre l'origine du repère suivant le centre du marquage. En effet, la rive de la chaussée n'est pas définie avec précision. La trajectoire du véhicule est associée au déplacement de son centre de gravité. Une phase de calibrage permet de réajuster ces valeurs par rapport au milieu de la voie. De plus, il est possible sans changer le dispositif d'acquisition des capteurs d'effectuer cette mesure par rapport au centre de la voie. Il suffit de le prévoir lors de l'installation du capteur. Le capteur optique permettrait d'effectuer de la classification entre les véhicules légers et les poids lourds, ainsi que de la mesure dynamique du poids des véhicules. Les deux sont capables d'effectuer du comptage, de la détection de passage, de la mesure de position latérale et de la mesure de vitesse.

13.

Perspectives

L'amélioration de la sécurité routière nécessite la création et l'utilisation de capteurs autonomes, noyés dans l'enrobé. Leur coût doit être faible. Le capteur optique installé dans la route, détecte les poids lourds et certaines voitures. Il est toujours opérationnel dix mois après son installation sur site. Le capteur résistif posé simplement sur la route détecte les véhicules légers, les poids lourds, les bicyclettes et les individus. Dans le cadre d'une application routière, il manque de robustesse pour une installation sur site. Des travaux de recherche sont à effectuer pour étudier sa déformation, notamment lorsqu'il est conditionné dans de la résine. Ces travaux seraient également utilisables pour le capteur fibré. De nouvelles techniques de conception sont à étudier pour rendre le capteur résistif plus robuste. La tige en nylon doit également être plus élastique ou être remplacée par un autre système. En effet, suite à des passages répétés, elle s'allonge. Cependant le faible coût des matériaux de fabrication et la simplicité de la mesure le rend très prometteur pour d'autres applications.

L'amélioration des résultats passe par une modélisation de la déformation du capteur dans son environnement. Ce modèle intègre la vitesse de déplacement et le poids des véhicules afin de déterminer la profondeur d'enfouissement nécessaire au capteur pour repérer des pressions exercées par un objet circulant dessus. Cette modélisation doit contenir la déformation de la route, de la résine et éventuellement du capteur dans le cadre du capteur résistif. Ainsi un calibrage du capteur pourra être effectuée intégrant notamment l'éventuelle présence d'ornières. Elle permettra également de calibrer le capteur optique plus correctement et de définir un seuil pour lequel les variations des longueurs d'onde sont considérées comme significatives. A partir de ce seuil, il est possible de connaître différentes informations telles que les surfaces de contact entre les pneus et le sol. Dans une future étude, l'amplitude des variations doit permettre de mesurer directement la masse des essieux. La manière dont il a été construit doit permettre de mesurer la vitesse en n'utilisant qu'un seul capteur (présence de plusieurs fibres optiques dans le capteur). La constitution d'un modèle, représentant la façon dont la fibre s'étire, permettrait de photo-inscrire moins de réseaux de Bragg sur le capteur en gardant la même précision sur la mesure de position des essieux et de la largeur des pneus. Ce modèle sert à reconstruire, avec

moins de points de mesure, la signature, c'est-à-dire la déformation du capteur correspondant au passage du véhicule.

L'ajout d'un modèle de déformation mécanique au modèle électrique développé pour le capteur résistif peut faire apparaître de nouvelles grandeurs physiques à mesurer. En effet, ce capteur mis trop profondément dans la chaussée de la route, ne subit pas de contact franc entre le fil résistif et le conducteur de retour. Néanmoins une variation de distance des conducteurs électriques engendre une variation de la capacité probablement proportionnelle au poids du véhicule. Un tel modèle permettrait de prévoir les variations électriques et de dimensionner correctement l'électronique de conditionnement. Par ailleurs, une variation de la distance entre le fil résistif et le conducteur de retour se traduit par une variation de capacité. La détection de ce phénomène accentuerait la sensibilité du capteur.

Ces capteurs proposent une nouvelle technologie alternative qui peut être mobilisée pour concevoir des systèmes de détection discrets pour le conducteur et sûrs de fonctionnement (redondance ou architecture multiple). L'observation de la trajectoire est réalisée par les mesures des paramètres géométriques (position du véhicule), cinématique (vitesse, accélération) ou dynamique (forces exercées sur le véhicule) à l'aide des capteurs externes ou internes aux véhicules. Jusqu'à présent, les capteurs ont été présentés individuellement, sans se préoccuper de leur interconnexion. La répartition sur la chaussée de plusieurs capteurs conduit à un système, certes, plus complexe, mais qui constitue un véritable outil d'observation des trajectoires. Les informations issues de ce réseau de capteurs sont gérées par un superviseur chargé de les recueillir et de les traiter. Le traitement de l'information peut s'effectuer directement ou en post-traitement en laboratoire. L'objectif final est de pouvoir reconstruire les traces et de les comparer entre elles afin de déterminer les trajectoires dangereuses des véhicules.

Actuellement, sur le site de Marans, cinq zones contenant deux boucles électromagnétiques décalées sont réparties sur 800 m par voie de circulation. Ces points de mesure ne sont pas suffisants pour connaître les différentes actions d'un conducteur sur cette grande distance. Pour obtenir un point de mesure contenant la vitesse et la position du véhicule, il faut une installation de deux boucles représentant une surface occupée de deux mètres cinquante sur quatre mètres cinquante ce qui représente une surface conséquente pour obtenir un point de mesure [Aubin *et al.*, 2008]. De plus, l'installation de boucles et de ses équipements électroniques reste onéreux.

La distance entre les capteurs permet de régler la précision longitudinale de la mesure de la trace des véhicules. Leur disposition est étudiée pour observer un écart de la trace d'un centimètre au maximum. Sur une ligne droite, plusieurs approches sont abordées pour atteindre l'objectif fixé : une approche fréquentielle ou une approche suivant l'étude d'une trajectoire circulaire.

D'après l'approche fréquentielle, [Lechner, 2002], la trajectoire du véhicule en ligne droite est périodique, sous la forme de lacets. Nous pouvons connaître par le théorème de Shannon la distance entre deux capteurs. En supposant une fréquence de lacet de 1 Hz et une vitesse de

25 m/s, une distance entre les capteurs de 12,5 m est nécessaire. Cependant la reconstruction du signal par analyse de Fourier rend cette méthode plus gourmande en calcul.

Une deuxième approche, exposée dans [Plainchault, 2005], suppose que le véhicule dévie de sa trajectoire rectiligne suivant une trajectoire circulaire dont le rayon est proche de celui qui offre un confort dynamique maximal accepté par l'automobiliste pour une vitesse de 90 km/h. Cette estimation donne une trajectoire circulaire de rayon 250 m. En appliquant cette théorie à notre problème, le véhicule parcourt une distance de 2,2 m avant qu'il ne s'écarte de sa trajectoire initialement rectiligne de plus d'un centimètre. Ce confort dynamique n'est bien souvent pas respecté dans le cas d'un accident. La distance inter-capteur doit donc être inférieure à cette valeur.

Une simulation fondée sur la trajectoire du véhicule pour une vitesse et un cap (ou angle de braquage) donnés permet d'affiner cette approche. Le déplacement du véhicule est associé au déplacement du modèle « bicyclette » (modélisation d'un véhicule comme une bicyclette [Mourllion *et al.*, 2006]). A la vitesse de 29 m/s pendant toute la durée de la manoeuvre et pour un angle de braquage de 0,05 rad, la distance parcourue par la bicyclette (selon l'axe de circulation de la route) est de 2,3 m au moment où son écart latéral dépasse le centimètre. Cet angle de braquage est une donnée réelle d'un véhicule qui roule dans un virage dur. Pour une expérimentation en ligne droite, une distance de 4 m est adaptée (soit un cap d'environ 0,015 rad).

Des outils reconstruisent la trace en utilisant l'ensemble des échantillons provenant des différents capteurs. La reconstitution du parcours des véhicules s'effectue par l'agrégation des données suivant plusieurs approches : l'approche déterministe et l'approche stochastique. La première approche s'appuie sur un modèle de déplacement d'un véhicule. Les commandes de vitesse et de braquage des roues permettent de retrouver la position et le cap du véhicule. L'approche stochastique est adaptée quand les données sont bruitées. En effet, l'utilisation de méthodes probabilistes comme le filtrage de Kalman ou le filtre particulaire permet de prédire la position et la vitesse d'un véhicule en fonction des mesures réelles, elles-mêmes pouvant être considérées comme plus ou moins fiables.

La trace reconstruite n'est pas facilement exploitable car elle est constituée de points ponctuels, même si le pas du calcul numérique est faible. Pour l'exploiter, il est nécessaire de transformer la trace en une adjonction de courbes mathématiques (interpolation par des fonctions mathématiques de type droite, polynômiale, spline cubique, clothoïde sigmoïde, etc. dont les données forment les contraintes et les limites servant à définir la fonction choisie). Si le pas donné par les capteurs est suffisamment fin, il est possible de passer directement à la modélisation par des courbes mathématiques.

Ces modèles mathématiques servent ensuite à comparer les différentes trajectoires. Une première approche consiste simplement à effectuer la différence entre les traces. L'utilisation de méthodes statistiques comme l'ACP permet de distinguer facilement les positions des conducteurs dont la trace est non-conforme aux autres conducteurs. Cependant tous les cas de détection de trajectoire dangereuse ne sont pas détectables par une telle comparaison car la cinématique

n'est pas prise en compte. Pour aller plus loin, il est envisageable d'utiliser la théorie des enveloppes. Des recherches sur ce sujet sont en cours au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC).

Annexes

A.

La fibre optique

A.1 Historique

Dans les années 1960, la fibre optique a connu son essor en même temps que l'avènement du laser. Le but de cette fibre était de transmettre de l'information sur une grande distance. Cependant les premiers essais furent peu concluants. Les pertes et les perturbations au sein de cette fibre étaient absolument incontrôlables. Ce support optique de transmission, appelé également guide d'onde optique, a été amélioré. La fibre optique est donc un de ces guides. Améliorée sans cesse depuis plus de 40 ans, la transmission par fibre optique a l'avantage de présenter une atténuation faible du signal, quasiment constante sur une grande plage de fréquences avec une bande passante considérable.

Elle possède des propriétés avantageuses. Sa fonction est double : permettre à la fois un transport d'informations et participer directement ou indirectement au mécanisme de transduction. Néanmoins, son prix - notamment celui de l'opto électronique associé - reste encore élevé pour accéder à une telle qualité de mesure. A l'heure actuelle, nous observons une diminution de son coût. Cette baisse provient de son emploi massif dans les télécommunications permettant un transport d'un flux conséquent d'informations sur de longues distances de manière rapide, efficace et sûre.

Elle est réalisée dans un matériau transparent, à l'instar de la silice, ayant un indice de réfraction élevé permettant la propagation de la lumière. Les rayons lumineux se propagent au sein de celle-ci par réflexions successives dans le coeur de la fibre. Ce dernier est entouré par une gaine optique, elle-même protégée par d'autres gaines. L'ensemble coeur-gaine optique forme la base de la fibre. L'indice de réfraction de cette gaine doit être inférieur à celui du coeur de la fibre afin d'obtenir une réflexion totale de l'onde à l'interface coeur-gaine et ainsi permettre à l'onde de continuer sa progression. Dans la pratique, l'écart d'indice entre le coeur et la gaine est souvent inférieur à 1 % [Joindot et Joindot, 1999]. Les rayons sont alors capables de rebondir au contact de la gaine.

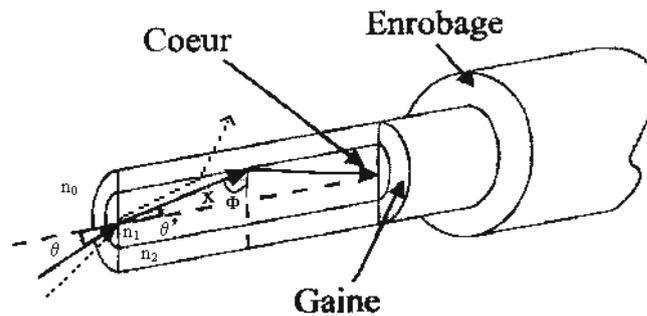


FIGURE A.1 – Constitution d'une fibre optique.

L'indice de réfraction dans l'air est de 1,00028. Dans ce milieu, la lumière se déplace à 299,706 km/s. A titre de comparaison, l'eau et la glace possède respectivement un indice de 1,333 et de 1,310. Un fibre en silice classique a un indice de réfraction de 1,487. La lumière s'y propage avec une vitesse de 201,607 km/s. Un revêtement primaire, l'enrobage, est parfois ajouté afin d'offrir une protection mécanique et de limiter la diffusion extérieure de la lumière. Néanmoins ce revêtement n'est pas obligatoire pour son fonctionnement.

Pour que l'onde se propage au sein de ce matériau diélectrique transparent, le signal lumineux doit être envoyé avec un angle, formé à partir de son axe, inférieur à ce qui est appelé l'ouverture numérique. Seule cette partie de la source lumineuse est autorisée à entrer et se propager le long du coeur de la fibre. L'ouverture numérique représente l'angle d'incidence limite au delà duquel le signal n'est plus réfléchi mais est complètement transmis. C'est l'angle de réfraction limite. Si des ondes arrivent avec un angle supérieur, alors elles ne pénètrent pas dans le coeur de la fibre. Cet angle se déduit de la relation de Descartes appliquée entre l'angle θ et θ' et des conditions de réflexion totale à l'interface coeur-gaine (également une conséquence de la relation de Descartes), figure A.1, [Grécias et Migeon, 1999]. Avec les dimensions de la fibre (diamètre du coeur et de gaine), l'ouverture numérique est le troisième paramètre le plus important. Plus celle-ci est grande, plus une grande quantité de lumière se propage, ce qui est un avantage dans le cas des sources divergentes comme dans le cas d'une Diode Electroluminescente (DEL) pour transmettre l'information. Néanmoins, les rayons arrivant avec un angle proche d'un grand angle de réfraction limite mettent plus de temps que les rayons proches de l'axe de propagation. Il en résulte un étalement dans le temps des impulsions transmises appelé dispersion modale.

$$ON = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (\text{A.1})$$

L'indice de réfraction est souvent variable dans le coeur de la fibre. Le profil d'indice explique l'évolution de l'indice de réfraction en fonction de la distance par rapport au centre de la fibre. Le profilé le plus simple et le plus étudié est la fibre à saut d'indice. L'indice de son coeur est constant (cas I sur la figure A.2). Il existe également des fibres dans lesquelles ce changement d'indice est moins abrupt comme pour les fibres à gradient d'indice. Il existe d'autres profils comme le montre la figure A.2 : le profil parabolique, le profil triangulaire ou même atypique ([Joindot et Joindot, 1999]). Ce changement d'indice entraîne une modification de l'ouverture

numérique. Le faisceau lumineux ne se propageant pas linéairement, l'équation A.1 n'est plus valide et devient alors plus complexe à établir.

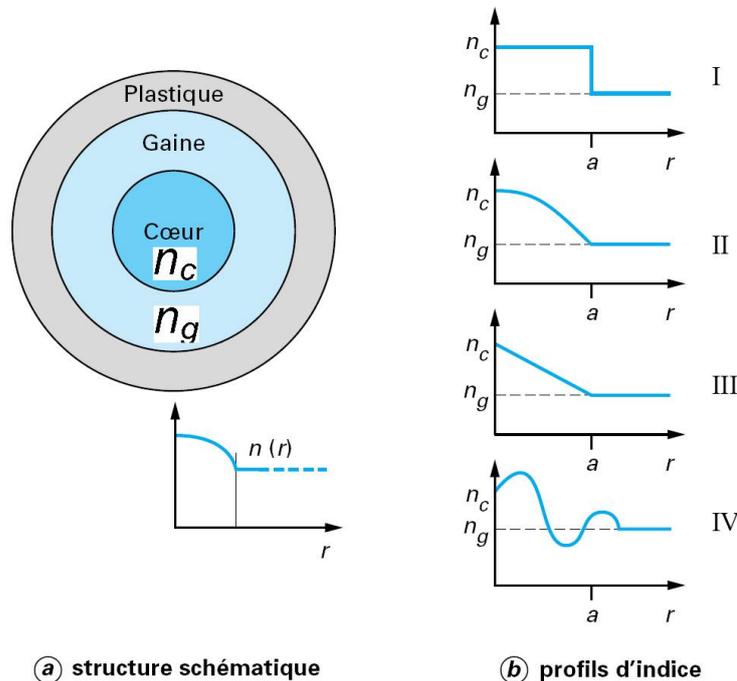


FIGURE A.2 – Exemple de différents profils d'indice (variation de l'indice n en fonction de r , distance par rapport à l'axe de la fibre).

La fibre optique guide l'onde afin de lui permettre sa propagation. Une onde se décompose en une superposition d'ondes sinusoïdales électriques et magnétiques d'amplitude variable. Pour comprendre exactement la manière dont la lumière se propage à l'intérieur de ce guide d'onde, la résolution des équations de Maxwell s'impose. Elle aboutit à une équation de propagation scalaire. Les solutions de cette équation correspondent aux modes guidés dans la fibre.

Un mode correspond à un trajet autorisé dans la fibre qui se caractérise par la répartition du champ électromagnétique autour de celle-ci et par sa vitesse de propagation. Une fibre optique est dite multimode si plusieurs modes se propagent dans son cœur. Pour cela, le cœur doit avoir un grand diamètre par rapport à la longueur d'onde [Joindot et Joindot, 1999], [Chartier *et al.*, 2003]. A l'inverse, une fibre monomode ne permet le passage que du mode fondamental. Pour indication, le cœur d'une fibre multimode a un diamètre de $50 \mu\text{m}$ pour un faisceau optique dont la longueur d'onde est généralement comprise entre 1 et $2 \mu\text{m}$ contre un diamètre de $9 \mu\text{m}$ pour une fibre monomode.

A.2 Propriétés de la fibre

La propagation d'une onde dans une fibre n'est pas indéfinie. Des réactions ralentissent et affaiblissent le signal [Joindot et Joindot, 1999], [Verneuil, 2003].

A.2.1 L'atténuation

L'intensité du signal lumineux diminue au fur et à mesure de sa progression dans la fibre. Cette atténuation dépend de l'absorption propre du matériau. Elle dépend également de la longueur d'onde. C'est la diffusion de Rayleigh. Théoriquement, pour la silice, elle est minimale pour une longueur d'onde avoisinant les 1 550 nm (atténuation de 0,25 dB/km).

A.2.2 La dispersion chromatique

C'est la somme de l'atténuation de la fibre due au matériau constituant le guide et du retard pris par la vitesse de groupe. La vitesse de groupe de l'onde dépend de sa fréquence, c'est à dire que le temps mis par un signal pour parcourir l'unité de longueur dépend de sa longueur d'onde. Le guidage entraîne lui-même une dispersion. Ainsi, deux impulsions envoyées au même moment à l'entrée d'une fibre auront un décalage temporel de quelques picosecondes après quelques kilomètres parcourus. Le paramètre de dispersion chromatique (D) est défini comme la dérivée du temps de propagation de groupe par rapport à la longueur d'onde, pour une longueur de fibre de 1 km (en ps/nm/km).

A.2.3 La dispersion de polarisation

La fibre n'est pas un cylindre symétrique. Cela peut provenir d'une non-symétrie de la fibre ou du profil. Ces causes sont engendrées lors de la conception, de torsion, de courbure, d'écrasement ou d'étirement lors de la pose. Une fibre qui à la base n'autorise qu'un seul mode, se verra transmettre deux modes indépendants ayant des polarisations orthogonales et la deuxième onde aura un retard sur la première.

A.2.4 Les principaux effets non linéaires : l'automodulation de phase, l'effet Raman et l'effet Brillouin

Plusieurs effets sont identifiables. Les trois principaux sont l'automodulation de phase (effet Kerr), l'effet Raman et l'effet Brillouin.

L'automodulation de phase est induite par une impulsion puissante qui provoque localement des variations d'indice de réfraction. Ces variations d'indice engendrent des variations de phase du signal.

L'effet Raman provient d'une interaction photon-phonon, c'est-à-dire d'un échange d'énergie entre l'onde optique et les vibrations du matériau.

L'effet Brillouin provient de l'interaction des phonons acoustiques. Les vibrations d'ensemble du matériau se propagent à la vitesse des ondes acoustiques. Pour que ces deux effets

soient visibles, la puissance injectée doit dépasser un seuil (typiquement 300 mW pour l'effet Raman dans une fibre à base de silice à 1550 nm et quelques milliwatts pour l'effet Brillouin).

A titre d'information, d'autres effets existent : la modulation de phase croisée, le mélange à quatre ondes, l'instabilité de modulation [Joindot et Joindot, 1999].

A.3 Les différents connecteurs

Un système utilisant une fibre optique comprend toujours une source lumineuse ainsi qu'un guide de l'onde optique, à savoir la fibre et un récepteur. Les différentes connections sont réalisées à l'aide de connecteurs se distinguant par des propriétés physiques et optiques différentes.

A.3.1 Les propriétés physiques

Quatre grandes familles de connecteur existent [Legrand, 2001], [Grassin d'Alphonse, 1997] :

- ST : le verrouillage s'effectue par la rotation d'un quart de tour de la bague externe à la manière des fiches BNC en électronique ;
- FC : un enfoncement suivant un détrompeur puis un vissage assure le verrouillage ;
- SC : le verrouillage ainsi que sa dimension sont identiques aux connecteurs RJ45 ;
- SFF : l'encombrement est identique à un connecteur RJ45 mais il permet de faire passer deux fibres optiques.

Chaque famille se distingue par une atténuation du signal optique spécifique.

A.3.2 Les propriétés optiques

L'insertion de connecteurs dans un montage engendre deux types de pertes liées aux liens physiques imparfaits.

A.3.2.1 Les pertes par insertion

Elle résultent de l'atténuation sur le signal due au connecteur.

A.3.2.2 Les pertes par réflexion

En quittant la fibre, une partie de la lumière est réfléchiée et retourne en direction du signal d'origine. Ce phénomène de « return loss » peut parfois détruire la source. Ces pertes se caractérisent par le taux de réflexion du signal [Legrand, 2001].

Type de connecteur	Pertes d'insertions (dB)	Taux de réflexion (dB) à la connexion (dB)
ST	0,3	25 à 35
FC	0,3 à 0,5	35 à 45
SC	0,3	65
SFF (SMA (droit))	1	8 à 20

Tableau A.1 – Caractéristiques optiques des différents connecteurs.

Les normes EIA-568 et ISO 11801 fixent dans les réseaux informatiques les atténuations et les longueurs de fibre autorisées.

A.4 L'impact de la non linéarité de la fibre

Les actions de désalignement entre les fibres engendrent des pertes dans le signal. Trois types de déformation existent :

- la déformation axiale, la plus critique ;
- la déformation radiale ;
- la déformation angulaire.

Lors du couplage entre deux fibres, la différence d'indice entre les deux coeurs ou les pertes de Fresnel atténuent également le signal [[Grassin d'Alphonse, 1997](#)].

A.5 Les avantages et les inconvénients de la fibre

Une fibre optique possède de nombreux avantages à savoir :

- l'immunité aux champs électromagnétiques ;
- la très faible perte du signal ce qui permet de grandes longueurs de déport ;
- son absence de danger de montage (pas de courant) ;
- la bande passante élevée ;
- la communication possible dans les deux sens ;
- la résistance à la corrosion ;
- l'installation possible en milieu extrême ;
- la légèreté et le faible encombrement du dispositif ;
- la sensibilité, la précision et le temps de réponse très performants ;
- l'inviolabilité de l'information ;
- la durée de vie ;
- l'abondance sur Terre de la matière première, la silice.

Ses inconvénients majeurs sont sa fragilité à nue, la connectique, sa maniabilité et la présence d'un rayon de courbure minimum afin que le signal se propage.

B.

Techniques de séparation des longueurs d'onde en aval

B.1 Généralités sur les techniques de séparation des longueurs d'onde

La lumière émise par un signal optique se caractérise par :

– sa longueur d'onde λ :

$$\lambda = \frac{c}{n \cdot \nu} \quad (\text{B.1})$$

avec λ la longueur d'onde de l'onde, n l'indice du milieu et ν sa fréquence ;

– sa luminance L :

$$dL = L \cdot \sigma \cdot d\sigma \quad (\text{B.2})$$

avec σ le flux énergétique ;

Ce flux énergétique se convertit en intensité grâce à une photodiode ou un phototransistor. Le photocourant I_{ph} s'ajoute au courant inverse de la jonction. L'expression du courant traversant la jonction est alors :

$$I_d = I_S \left(e^{\frac{E_g}{nU_t}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (\text{B.3})$$

avec E_g l'énergie nécessaire du photon pour qu'il puisse quitter la bande de valence (limite qui permet au photon d'être mobile) et U_t la tension thermodynamique de la diode.

– son énergie atomique pour E_2 et E_1 , deux niveaux d'énergie (formule de Planck) :

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu \quad (\text{B.4})$$

avec h la constante de Planck

Dans la théorie ces trois variables sont utilisables. Cependant, les énergies atomiques ne peuvent être mesurées que par des appareils de mesure très perfectionnés. Cette solution n'est quasiment jamais retenue puisque le coût d'une seule mesure est très élevé. Il nous reste donc la mesure de la longueur d'onde et de la luminance. L'acquisition d'un signal optique pour son traitement numérique nécessite l'utilisation de convertisseurs de signaux optiques vers des signaux électriques. Dans la réalité du marché, les composants disponibles sont de type photodiode, photorésistance, phototransistor, capteur CCD... Cependant ces cellules renvoient une intensité, qui ne permet pas ensuite le calcul de la longueur d'onde (en réalité selon Louis De Broglie, l'intensité de l'onde mesure la probabilité de la présence des photons [Grécias et Migeon, 1999]). Elles mesurent l'éclairement reçu. Le courant émis par une photodiode, par exemple, renseigne l'utilisateur sur l'intensité du signal. Elle varie en fonction de la sensibilité du photodétecteur aux longueurs d'onde. Dans cette conversion, l'ensemble des longueurs d'onde est pris en compte. A l'heure actuelle, les systèmes d'acquisition électronique ne permettent pas de faire la distinction entre les différentes longueurs d'onde d'un signal optique. Dans le cadre des capteurs à réseaux de Bragg, l'information est facilement obtenue grâce à la mesure des longueurs d'onde de Bragg. La distinction des variations de ces longueurs d'onde est indispensable pour connaître celle de la mesurande.

Les techniques présentées dans la suite de l'annexe B portent **uniquement** sur la séparation des ondes **en aval**.

B.2 Les appareils à prisme

Le prisme de la figure B.1 permet une diffraction du signal. La relation de Cauchy et les lois de Descartes ont permis de caractériser les prismes ; La loi de Cauchy :

$$n = P + \frac{Q}{\lambda^2} \quad (\text{B.5})$$

Cette relation décrit la valeur de l'indice de réfraction d'un prisme n en fonction de sa longueur d'onde λ . Cependant la détermination de P et Q fluctue en fonction de chaque prisme.

La loi de Descartes :

$$\sin(i) = n * \sin(r) \sin(i') = n * \sin(r') \quad (\text{B.6})$$

Ces relations nous permettent d'en déduire [Grécias et Migeon, 1999] :

$$D = i + i' - A \text{ avec } A = r + r' \quad (\text{B.7})$$

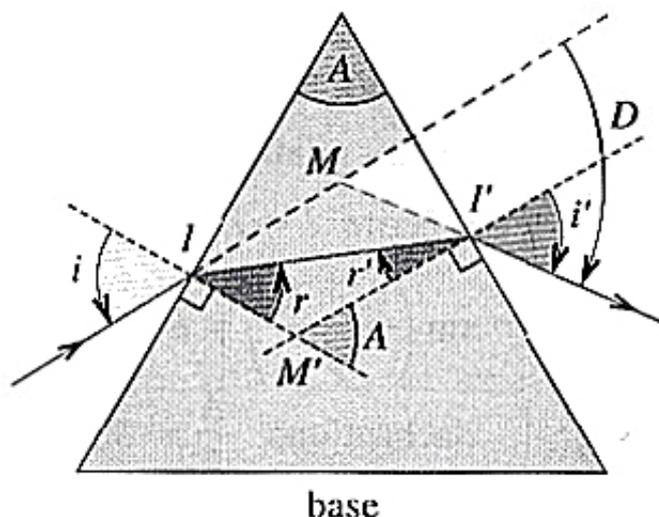


FIGURE B.1 – Signal optique diffracté lors de la traversée d'un prisme.

Le positionnement d'un échantillonneur entre le prisme et le photodétecteur permet de ne laisser entrer qu'un spectre fin de longueurs d'onde B.2.

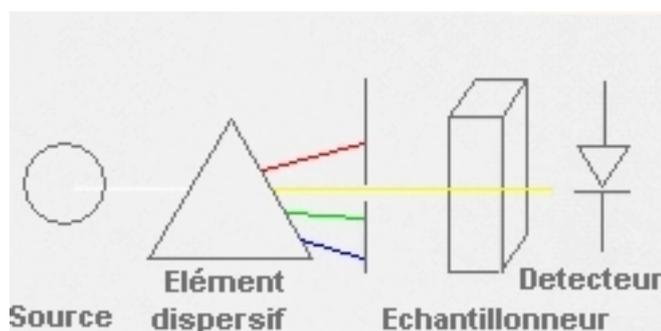


FIGURE B.2 – Echantillonnage de la longueur d'onde après un prisme.

Une autre technique consiste à utiliser une barrette ou une matrice composée de plusieurs éléments photosensibles, souvent des photodiodes InGaAs. Placés côte à côte, la longueur d'onde est déterminée par leur position. La résolution est ainsi accrue par rapport au système précédent. La barrette ou matrice de hauteur x se place verticalement à une distance d du point M B.1. Cette distance d s'exprime de la manière suivante :

$$d = \frac{x}{2 \cdot \tan\left(\frac{D}{2}\right)} \quad (\text{B.8})$$

Il faut que la première cellule photosensible et la dernière soient précisément éclairées par la longueur d'onde la plus faible et la plus forte du rayon émergent. La précision de l'information en longueur d'onde dépend directement du nombre de cellules photosensibles. Si la distance de positionnement de la barrette est supérieure à d , une partie de l'information issue de celle-ci est perdue (en terme de longueur d'onde). A l'inverse, si la distance de positionnement de la barrette est inférieure à d , la précision diminue perdue en terme de résolution spectrale.

Dans la plupart des applications, le prisme est utilisé pour des longueurs d'onde se situant dans le visible. L'ajustement visuel du signal émergent est plus simple. Plus un prisme est dispersif et plus il est capable de séparer deux longueurs d'onde voisines. Ces appareils dispersifs doivent être montés sur un dispositif assurant leurs insensibilités aux vibrations. Cette méthode est plutôt à proscrire dans le cadre de mesures de terrain.

B.3 Les filtres passifs

Ce dispositif transforme une variation de longueur d'onde en une variation d'intensité. Le filtre passif possède une fonction de transfert intensité en fonction de la longueur d'onde linéaire. La deuxième voie sert à normaliser le signal. Le filtre passif peut être un filtre coloré ou diélectrique voire un réseau de Bragg.

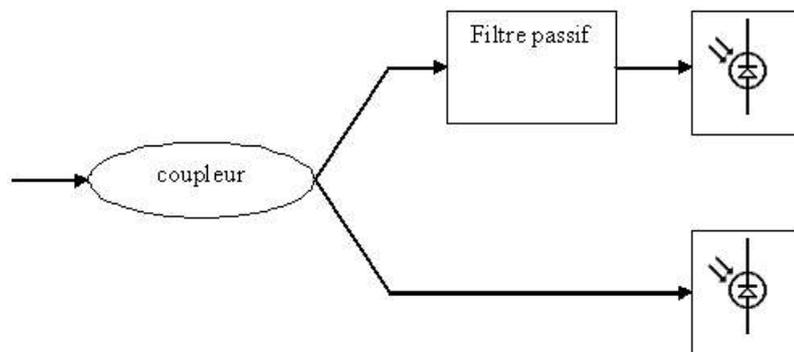


FIGURE B.3 – Détection de la longueur d'onde de Bragg par filtre passif.

B.4 Les appareils interférentiels

La méthode consiste à créer un phénomène d'interférences entre les signaux afin d'en déduire une longueur d'onde. Ce phénomène d'interférences provient de la superposition de deux faisceaux lumineux. L'intensité lumineuse dans la région de superposition varie d'un point à l'autre entre des maxima qui dépassent la somme des intensités des deux faisceaux pris séparément et des minima qui peuvent être nuls. En général, lorsque les faisceaux lumineux ont pour origine des sources optiques distinctes, aucune interférence est créée [Queyrel et Mesplède, 1996].

La séparation du faisceau initial en un ou plusieurs faisceaux s'effectue grâce à un dispositif interférentiel. Deux solutions sont possibles :

- une division du front d'ondes traduit la séparation en deux du faisceau initial suite au passage dans deux ouvertures proches ;
- une division d'amplitude se caractérise par une division du faisceau suite à des réflexions et transmissions successives.

Si ce phénomène d'interférences est observable dans toute la zone de l'espace où se superposent les faisceaux, alors les interférences sont dites non localisées.

Pour observer des interférences, les ondes doivent respecter certaines conditions :

- leur synchronisme : elles doivent posséder la même fréquence (ou la même pulsation ou la même période) ;
- leur cohérence : elles doivent présenter au point d'observation une différence de phase constante dans le temps ;
- leurs états de polarisation soient colinéaires et orthogonaux.

Lorsque ces conditions sont réunies, des franges d'interférence apparaissent alternant entre des franges (ou zones) brillantes et sombres. Les longueurs d'onde présentes dans le signal optique sont déduites de la mesure de ces franges. Cette mesure se fait sur un plan noir parsemé d'une matrice de photodiodes. Chaque photodiode renvoie ainsi l'intensité lumineuse de sa frange. Cela donne ainsi le placement des franges (interfranges), qui ensuite permet d'en déduire la longueur d'onde. Ainsi, pour deux fentes d'Young placées dans l'air - deux fentes fines et très proche l'une de l'autre à bords parallèles dans un écran opaque - éclairées au moyen d'une fente-source très fine émettant une lumière monochromatique de longueur d'onde λ , l'interfrange i est donnée par :

$$i = \frac{\lambda D}{a} \quad (\text{B.9})$$

avec D la distance entre les fentes et l'écran, et a la distance entre les fentes. Lorsque la distance entre les fentes est connue, cette relation permet de déterminer la longueur d'onde.

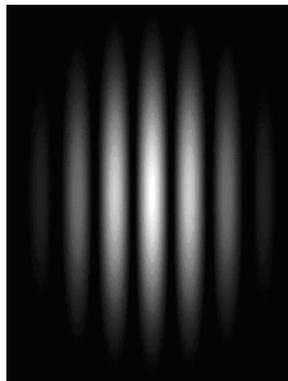


FIGURE B.4 – Exemple d'interfranges pour deux fentes d'Young.

Les interféromètres sont ainsi utilisés pour retrouver les variations de longueurs d'onde en utilisant les mesures d'interfranges ou de déphasage entre les signaux. La détection du déphasage est réalisée par des dispositifs de type Michelson ou Mach-Zehnder. Ces dispositifs sont disponibles sous différentes formes : optique classique, fibres optiques ou optique intégrée. La variation de phase $\Delta\phi$ est définie selon la formule suivante :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi n\delta}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (\text{B.10})$$

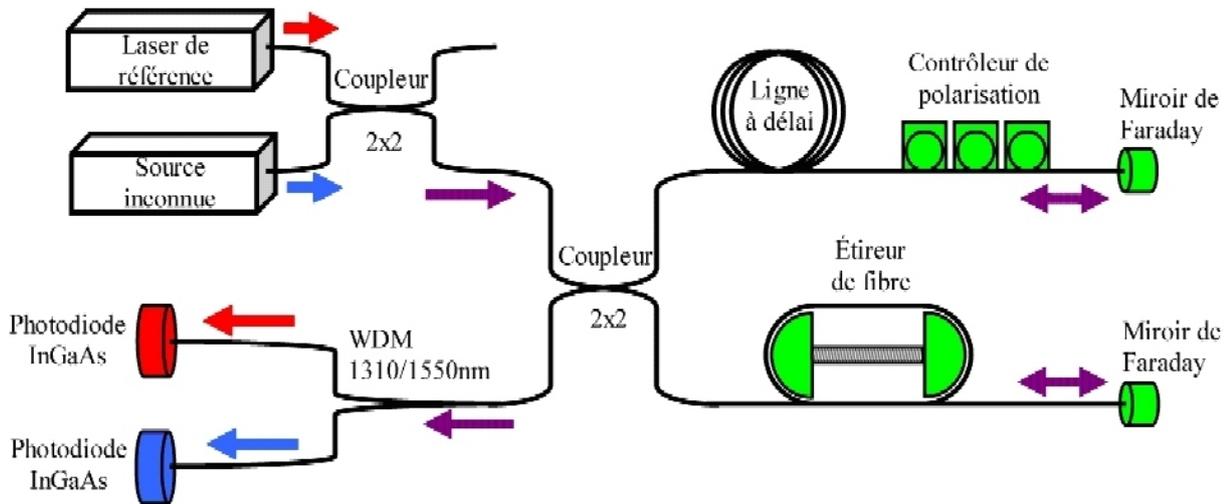


FIGURE B.5 – Dispositif fibré reprenant le principe de l’interféromètre de Michelson.

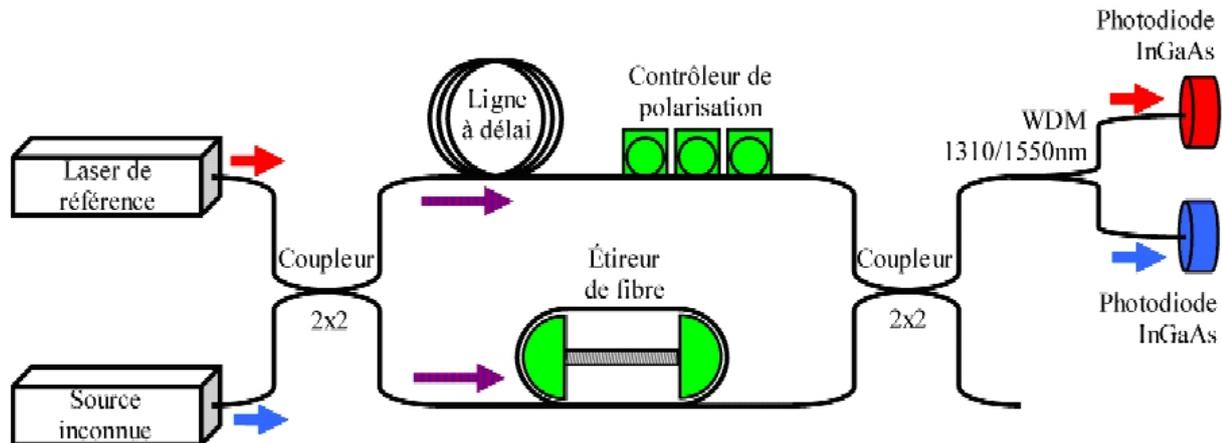


FIGURE B.6 – Dispositif fibré reprenant le principe de l’interféromètre de Mach-Zehnder.

L’interféromètre est constitué de deux miroirs simples et de deux miroirs semi-réfléchissants (miroirs de Faraday et coupleurs sur la figure). Un faisceau lumineux est divisé en deux, puis ces deux faisceaux sont alors recombinaés à l’aide d’un miroir semi-réfléchissant (coupleur sur la figure). Ils vont donc pouvoir interférer entre eux. La figure d’interférences ainsi obtenue permet de réaliser des mesures très précises sur la source de lumière. L’interféromètre de Mach-Zehnder est assez similaire B.6. Une source à large spectre injecte son signal dans la fibre optique à réseau de Bragg. Le signal réfléchi par le capteur à réseau de Bragg est envoyé dans les deux entrées de l’interféromètre. La différence de marche obtenue renseigne sur le déphasage. Le spectromètre à transformée de Fourier couramment utilisé en recherche ou en industrie ou le spectromètre à cristal utilisent ce même principe de Michelson [Bertrand, 1998]. L’interféromètre de Sagnac est également utilisé [Kim *et al.*, 2006].

B.5 Les filtres actifs

Cette méthode consiste à utiliser un filtre optique réglable en longueur d'onde. Une simple cellule photosensible repère la présence ou non de la longueur d'onde. L'étendue spectrale de mesure dépend alors de la plage d'accord du filtre. La résolution spectrale de la mesure dépend de la sélectivité du filtre. Ces filtres sont fabriqués en utilisant deux techniques : les cavités Fabry-Perot ou les cellules acousto-optiques ([Bertrand, 1998]). Une solution annexe existe : un réseau de Bragg subit une action mécanique permettant ainsi de faire varier la longueur d'onde réfléchiée et donc l'accord du filtre. Des réseaux de Bragg fixés sur des céramiques piézo-électriques forment un très bon filtre sélectif [Ferdinand, 1999].

A la base, les cavités réalisées par Perot et Fabry ont été conçues pour résoudre des problèmes d'interférences. Les rayons lumineux sont réfléchis à l'intérieur de la cavité, et en ressortent partiellement (figure B.7).

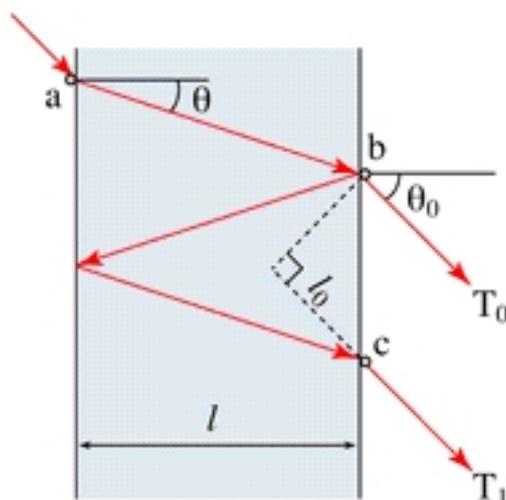


FIGURE B.7 – Présentation de la cavité Fabry-Perot.

L'interféromètre est éclairé par une source de lumière monochromatique. Un rayon particulier représenté comme sur la figure B.7 se réfléchit dans la cavité. A chaque contact avec la paroi de droite, une partie s'échappe. Les rayons lumineux sortant par la deuxième surface aux points b et c n'ont pas parcouru la même longueur de trajet (ou chemin optique). Ainsi, ils présentent un déphasage l'un par rapport à l'autre, dépendant de l'angle θ . Ces deux rayons interfèrent entre eux ainsi qu'avec tous les autres rayons qui auront été réfléchis plusieurs fois entre les deux surfaces réfléchissantes. Le rayon est transmis ou non selon les règles établies par Descartes, règles identiques à celles définissant l'entrée et les réflexions successives d'une onde dans un fibre optique. Seules quelques valeurs de θ permettent de transmettre la lumière du rayon incident. Chacune de ces valeurs peut être directement visualisée : elles correspondent à une série d'anneaux concentriques. Cette série d'anneaux fera alors apparaître les franges sur un plan noir, qui permettra par la suite d'en déduire les longueurs associées comme évoqué précédemment.

Pour utiliser cet interféromètre comme filtre sélectif, il faut l'éclairer au moyen d'une bande spectrale de largeur inférieure à la large de l'intervalle spectral libre, c'est-à-dire l'espace qui correspondant à deux anneaux consécutifs dans lequel les différences de marche sont séparées de $\delta = \lambda$. Seule l'onde dont l'anneau brillant est contenu dans cet intervalle est transmise [Queyrel et Mesplède, 1996]. Pour faire varier l'accord du filtre, les parois de la cavité sont déplacées ou déformées.

B.6 Les réseaux de diffraction

A partir d'un réseau de diffraction et de deux miroirs, l'observation d'un spectre optique est possible B.8. Le réseau de diffraction est monté sur moteur, permettant sa rotation et l'éclatement du spectre. Le réglage de la distance focale des miroirs redirige la longueur d'onde vers la cellule photosensible [IDIL, 2007], [Li et al., 2007].

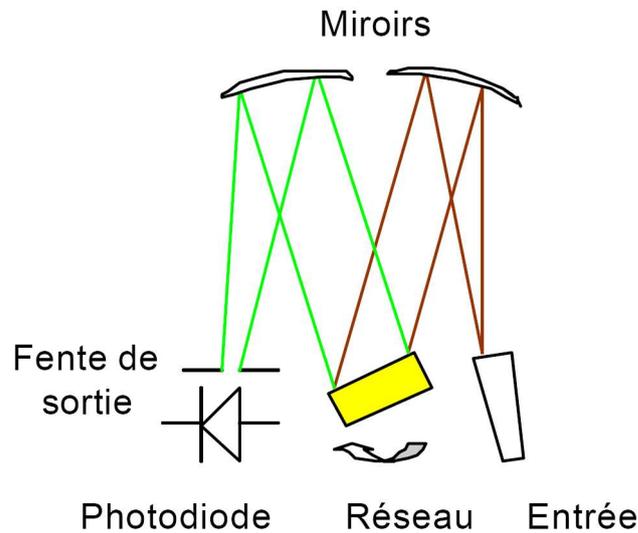


FIGURE B.8 – Analyseur de spectre optique à réseau de diffraction.

Comme pour la détection par prisme, l'installation d'une barrette photosensible assure la détection de l'intensité lumineuse pour les différentes longueurs d'onde éclatées par le réseau.

C.

Spécification de la norme Française E 03-001

La figure C.1 représente les dimensions imposées par la NF E 03-001.

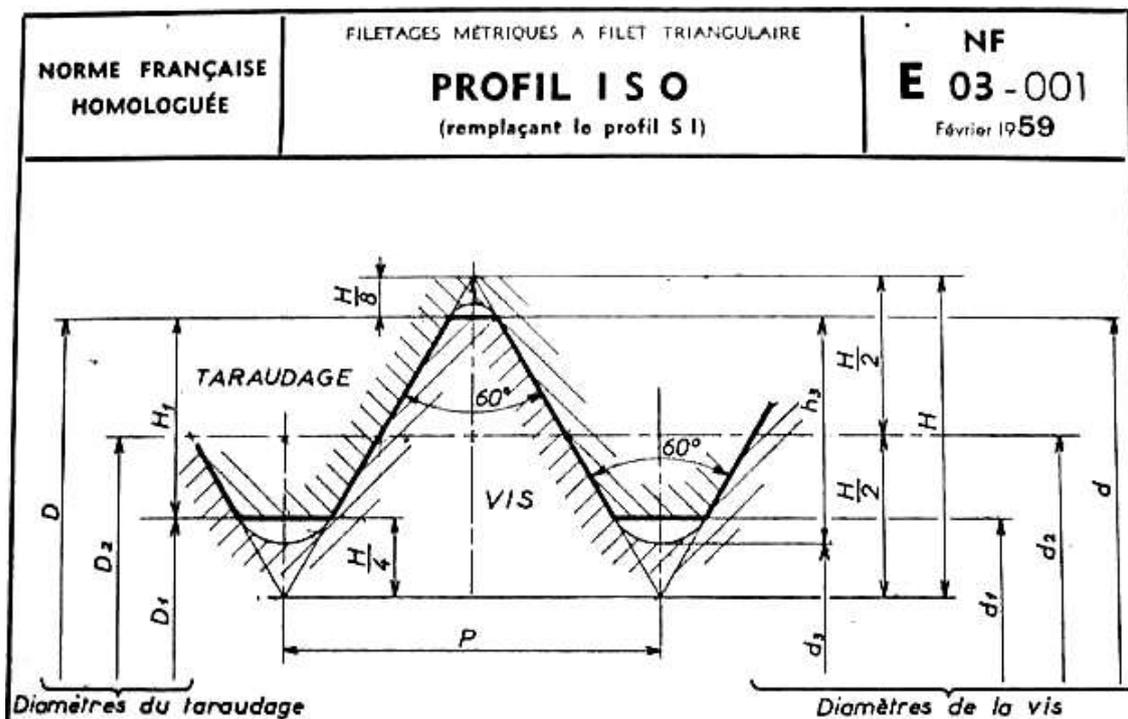


FIGURE C.1 – Spécification de la Norme Française E 03-001.

avec :

- D, d : diamètre nominal ;
- P : pas ;
- H : hauteur du triangle primitif ;
- D_1, d_1 : diamètre du fond de filet du taraud ;

- D2, d2 : diamètre à flancs de filet ;
- d3 : diamètre du noyau de la vis ;
- H1 : profondeur du filet du taraud ;
- h3 : profondeur du filet de la vis.

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P \quad (\text{C.1})$$

$$\begin{aligned} D_2 = d_2 &= d - 3/4 \cdot H \\ &= d - \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot P \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{aligned} D_1 = d_1 &= d_2 - 2\left(\frac{H}{2} - \frac{H}{4}\right) \\ &= d - \frac{5\sqrt{3}}{8} \cdot P \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

$$\begin{aligned} d_3 &= d_2 - 2\left(\frac{H}{2} - \frac{H}{6}\right) \\ &= d - \frac{17\sqrt{3}}{24} \cdot P \end{aligned} \quad (\text{C.4})$$

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{D - D_1}{2} \\ &= \frac{5\sqrt{3}}{16} \cdot P \end{aligned} \quad (\text{C.5})$$

$$\begin{aligned} h_3 &= \frac{d - d_3}{2} \\ &= \frac{17\sqrt{3}}{48} \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

D.

Complément d'illustration des mesures acquises sur les capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg

D.1 Les mesures en dynamique à vitesse réelle

Cette étape consiste à relever des positions alors qu'un véhicule roule dessus avec une vitesse réelle, c'est-à-dire avec des vitesses pratiquées sur les routes françaises. Dans cette situation, pour des raisons de sécurité, l'ensemble du système d'acquisition des mesures a été déporté. Le lien entre les quatre fibres optiques constituant chaque capteur et l'interrogateur nécessite l'ajout de quatre fibres optiques jouant le rôle de rallonge. Ne disposant que d'une seule fibre pour faire cette rallonge, les mesures suivantes sont issues que d'une seule des quatre fibres constituant chaque capteur. Les autres fibres ne sont pas interrogées.

Dans un premier temps, une étude relative au capteur Capteur à Fibres Optiques (CFO) n°1 a été menée. Dans les cas d'études suivants, il est difficile de connaître la position exacte des véhicules dans la mesure où ceux-ci sont des camions pris au hasard dans le trafic. Ces études fournissent une indication sur le comportement du système.

Trois paramètres ont un intérêt dans notre étude. Tout d'abord la longueur d'onde centrale de Bragg puisse que sa variation indique un changement de contrainte exercée sur la fibre optique. Ensuite la position physique qui est liée directement à la longueur d'onde. Et enfin la variation dans le temps. Des échantillons sont pris toutes les millisecondes relevant les longueurs d'onde centrale de Bragg. La figure D.1 révèle les mesures prises par l'interrogateur à réseaux de Bragg sur la fibre n°2 du CFO n°1 en fonction du temps. Au temps $t = 6,05$ s et $t = 6,34$ s, un événement a engendré des variations au sein de plusieurs réseaux de Bragg. Il est aisé de faire le rapprochement avec deux essieux d'un véhicule.

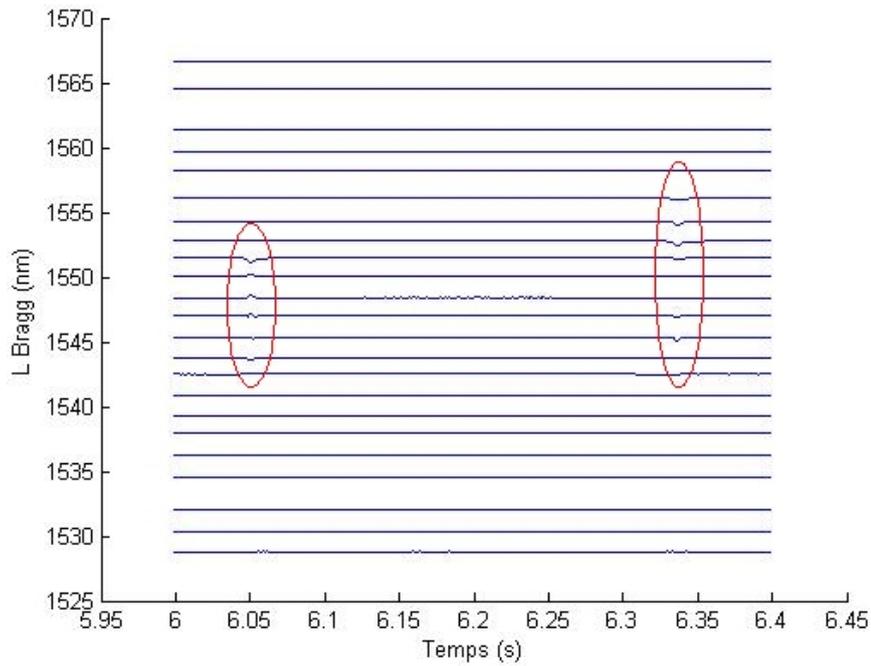


FIGURE D.1 – Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur la fibre n°2 de CFO1 en fonction du temps.

L'observation des variations des longueurs d'onde entre une situation initiale sans véhicule circulant sur le capteur et une situation dans laquelle un véhicule circule dessus permet de mieux visualiser ces changements. La figure D.2 relate ces variations en fonction du temps.

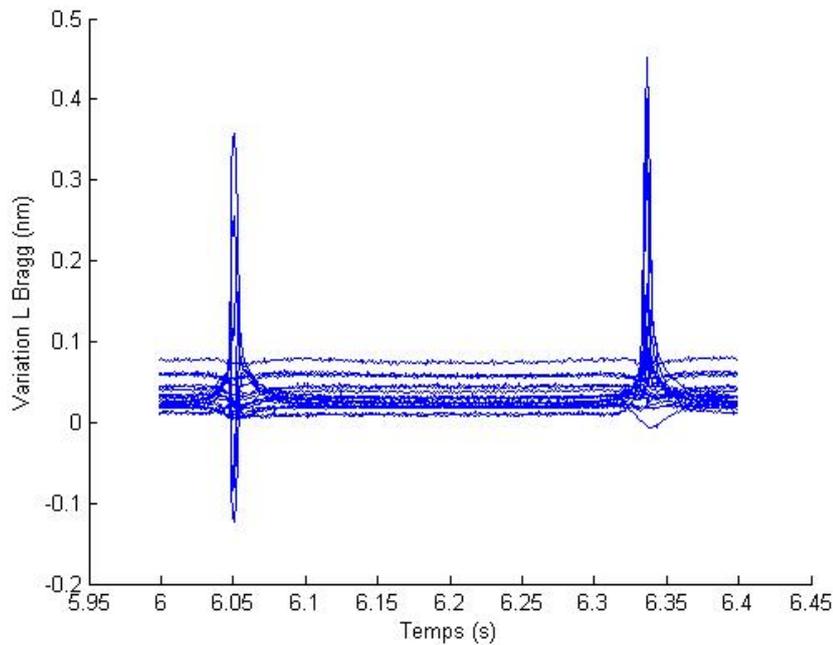


FIGURE D.2 – Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction du temps, lors du passage d'un véhicule.

Pour distinguer plus particulièrement les changements de chaque réseau la figure D.3 tient compte de la position physique du réseau le long du capteur. Ainsi, il est possible de visualiser l'endroit de ces changements.

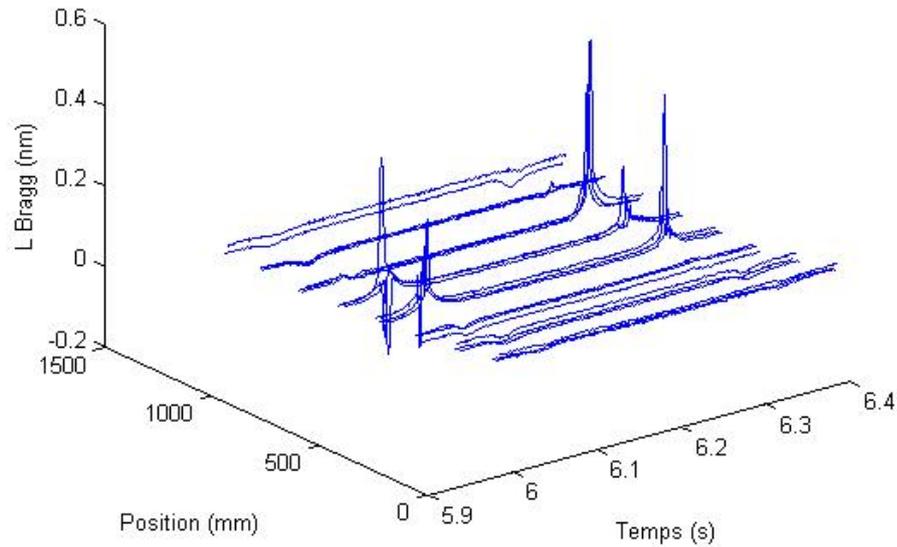


FIGURE D.3 – Variations des longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction de la position physique du réseau et du temps.

Les variations les plus importantes ont lieu entre 60 cm et 98 cm comme le montre la figure D.4.

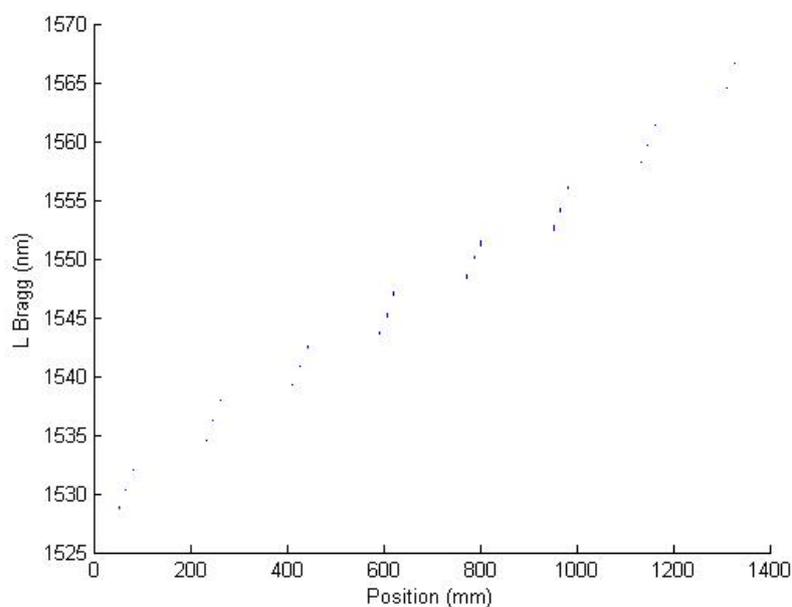


FIGURE D.4 – Longueurs d’onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction de la position physique du réseau.

Dans la zone comprise entre 60 cm et 98 cm, la plupart des réseaux sont comprimés comme le montre la figure D.3. De part et d'autre de cette zone, les réseaux sont légèrement étirés de manière progressive. Les plus grands pics atteignent 0,43 nm. Pour les valeurs négatives, le plus grand pic atteint 0,14 nm de dénivelé. Dans la zone des 60 à 98 cm, les pics négatifs sont précédés et suivies d'une phase ascendante qui indique que la fibre est comprimée. Entre les phases ascendantes, le pic négatif indique que la fibre a été étiré en cet endroit.

Il est très difficile de connaître avec certitude la profondeur d'implantation des fibres optiques dans la chaussée de la route.

Entre le moment où les premières mesures ont été réalisées et les dernières mesures, les longueurs d'onde de références ont évolué. Cette information montre que le matériau a besoin d'un temps d'adaptation afin qu'il trouve sa position d'équilibre.

D.2 Vues d'ensemble de graphiques complémentaires suite au passage du camion du LRPC sur le capteur

Les figures D.5, 10.9, D.6, D.7, D.8, D.9, D.10 relatent l'information générale du premier passage du camion.

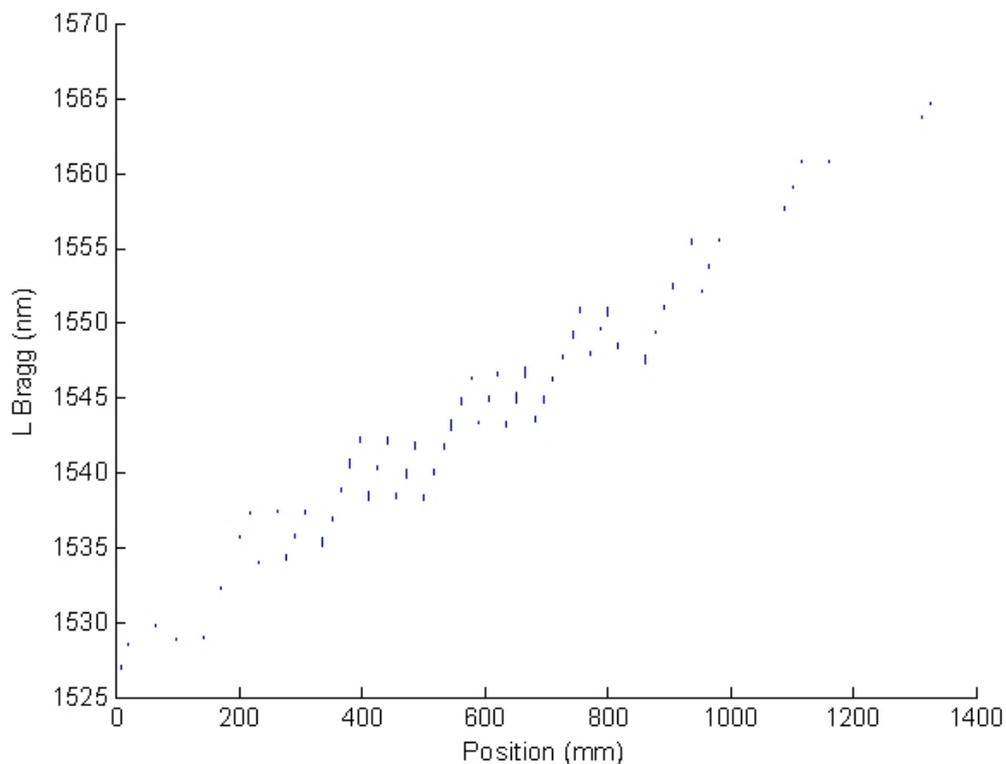


FIGURE D.5 – Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg.

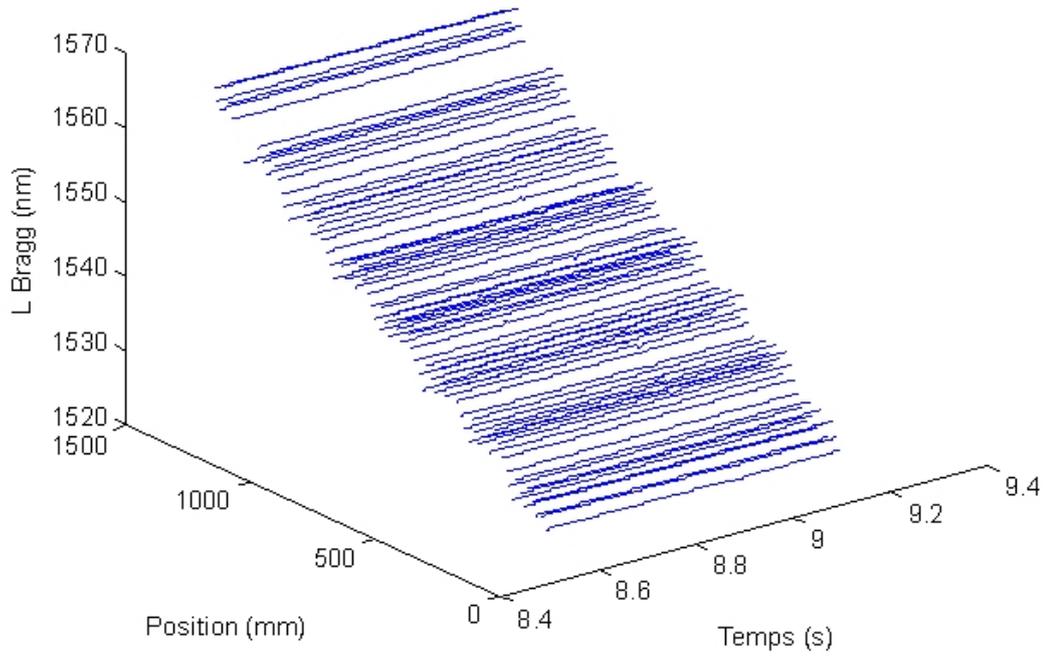


FIGURE D.6 – Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

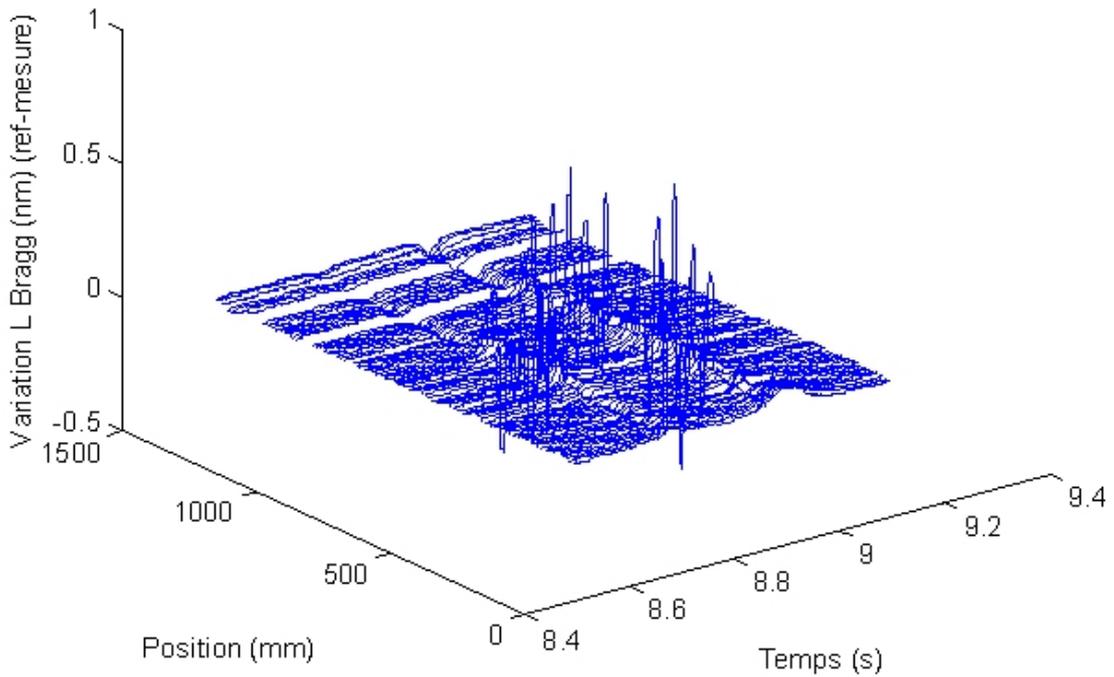


FIGURE D.7 – Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

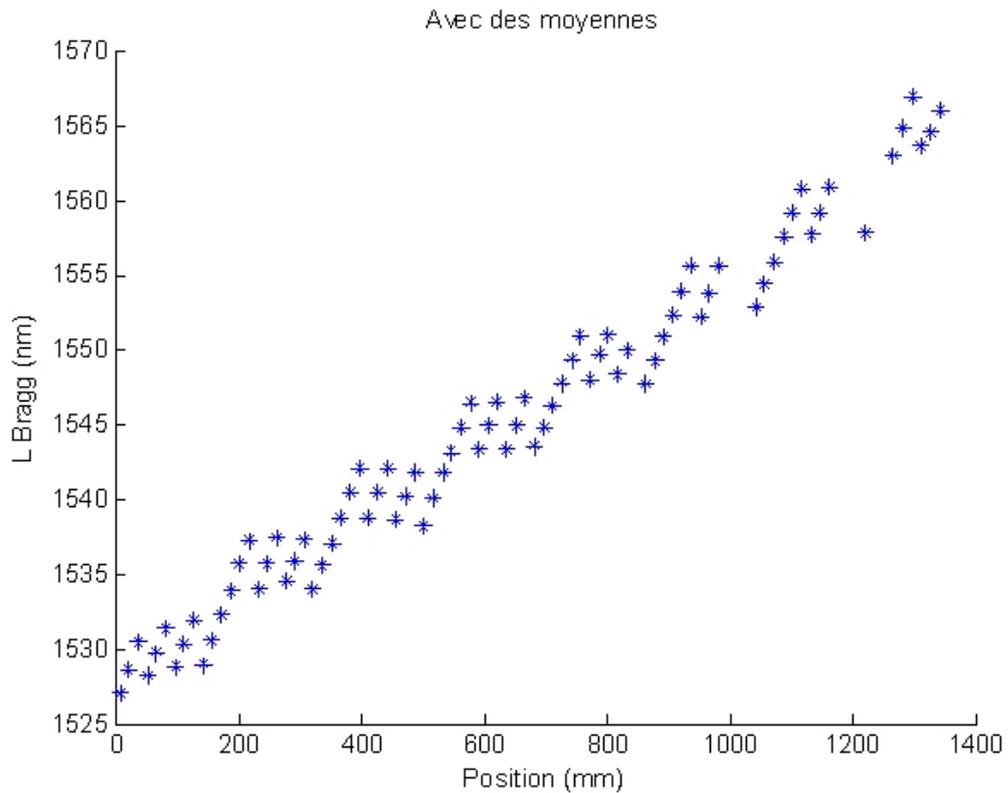


FIGURE D.8 – Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de référence '+' et mesurées 'x' sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg.

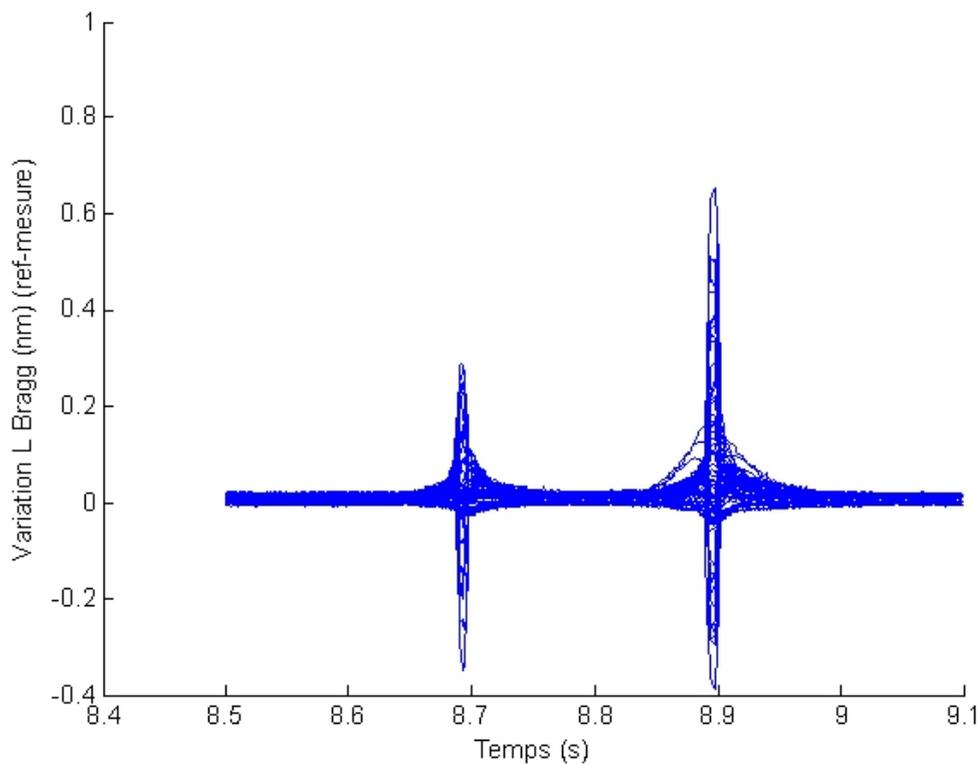


FIGURE D.9 – Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.

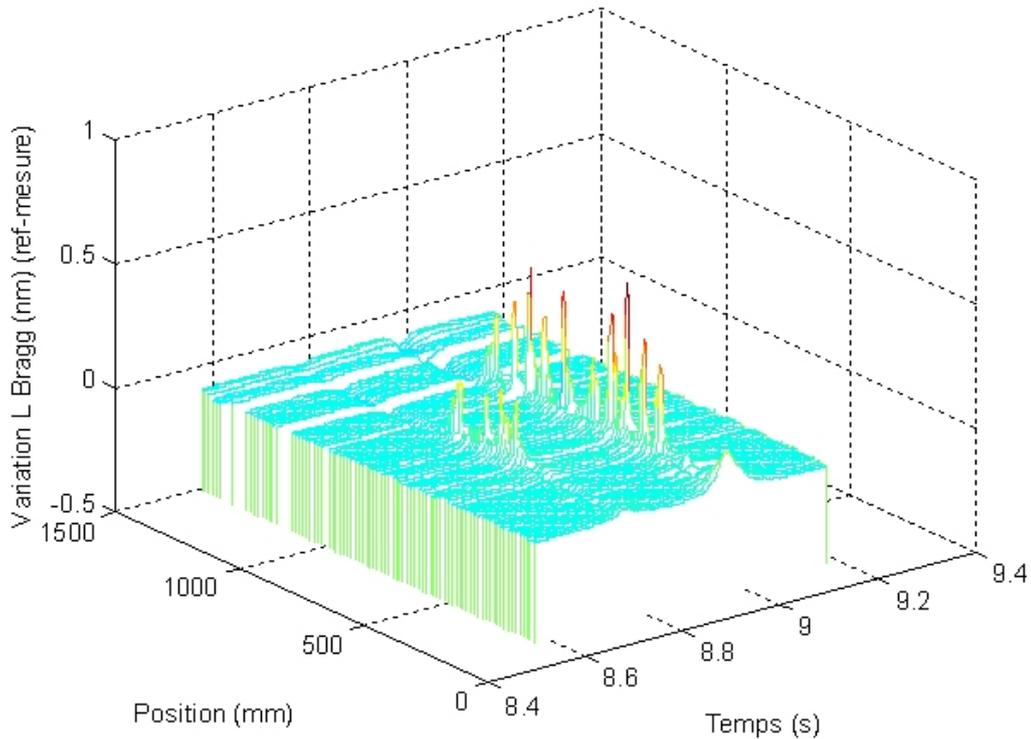


FIGURE D.10 – Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg, abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

Les figures D.11, D.12, D.13, D.14, D.15, D.16 présentent les vues d'ensemble du cinquième passage

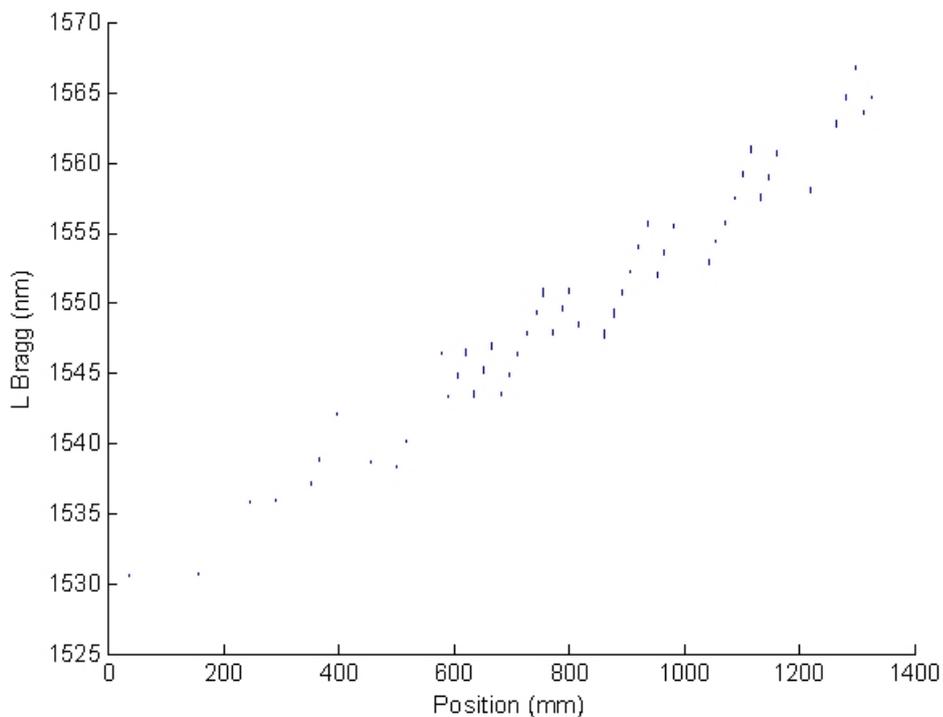


FIGURE D.11 – Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg.

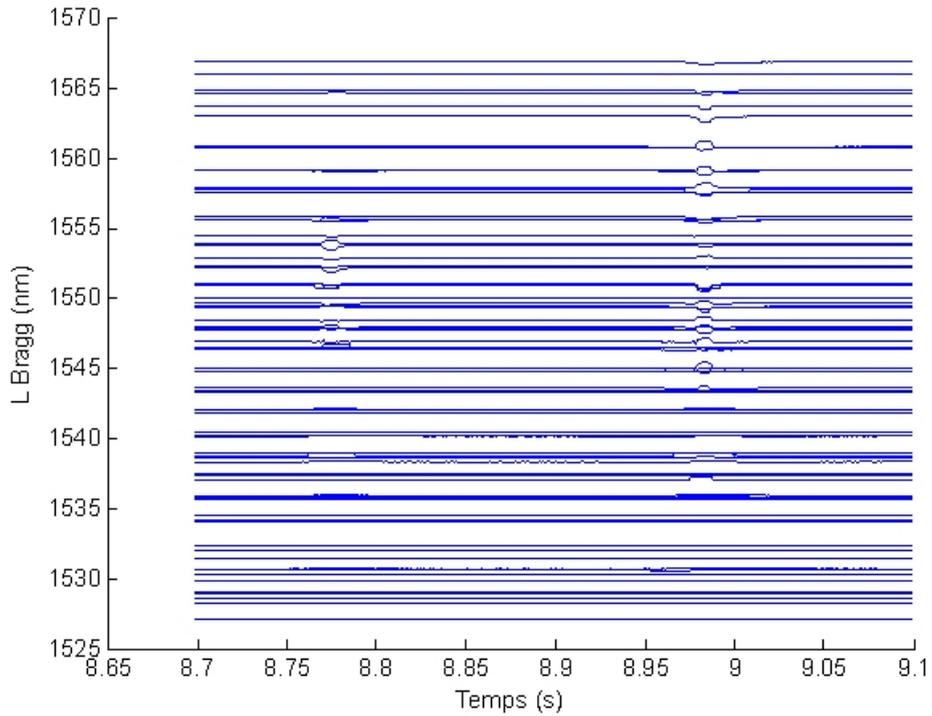


FIGURE D.12 – Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction du temps.

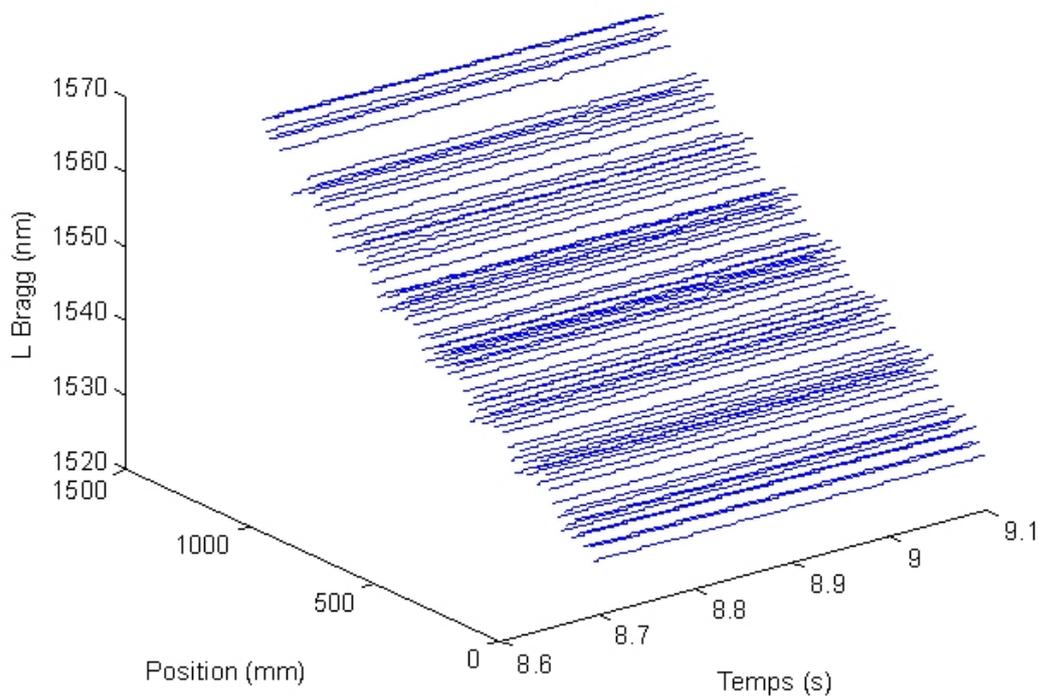


FIGURE D.13 – Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

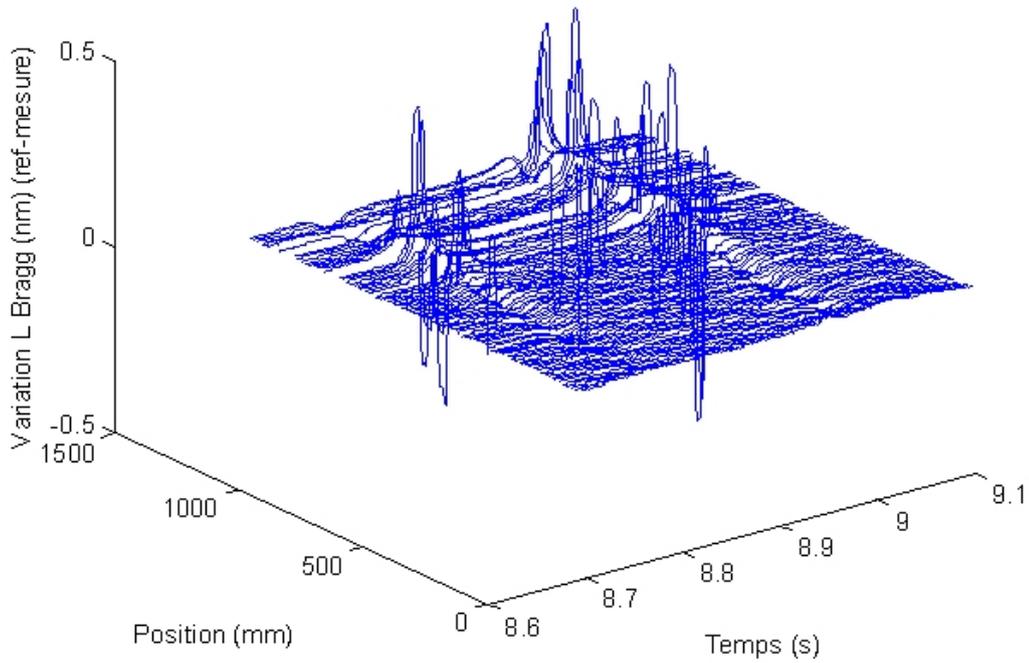


FIGURE D.14 – Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.

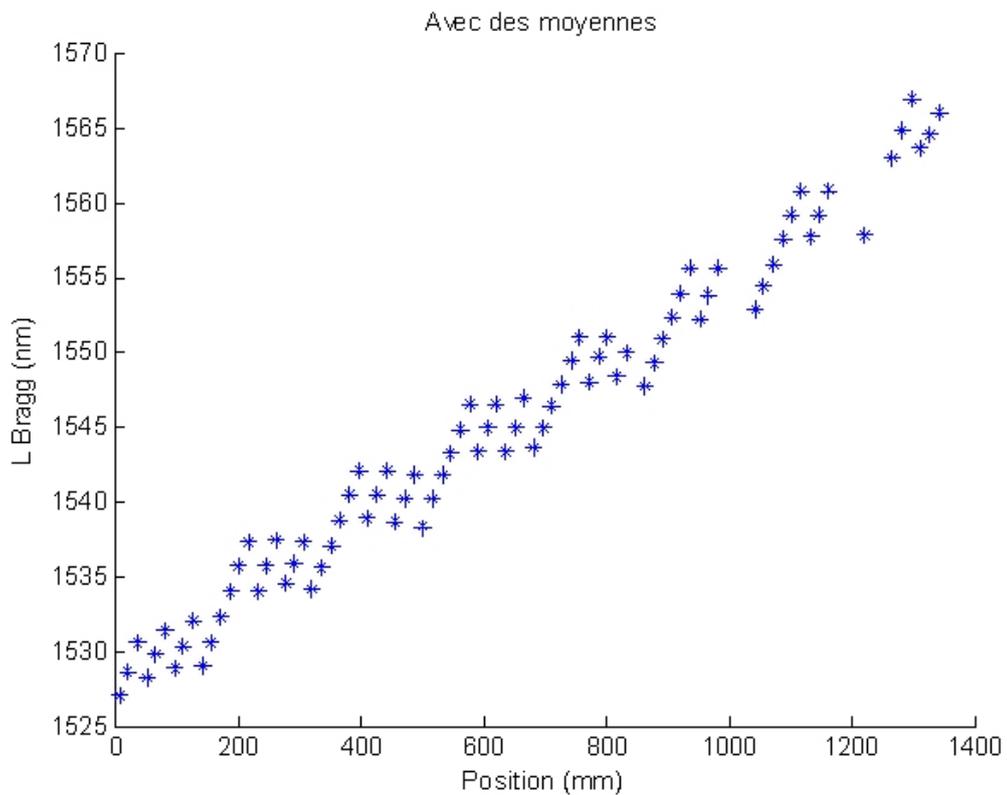


FIGURE D.15 – Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de référence '+' et mesurées 'x' sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg.

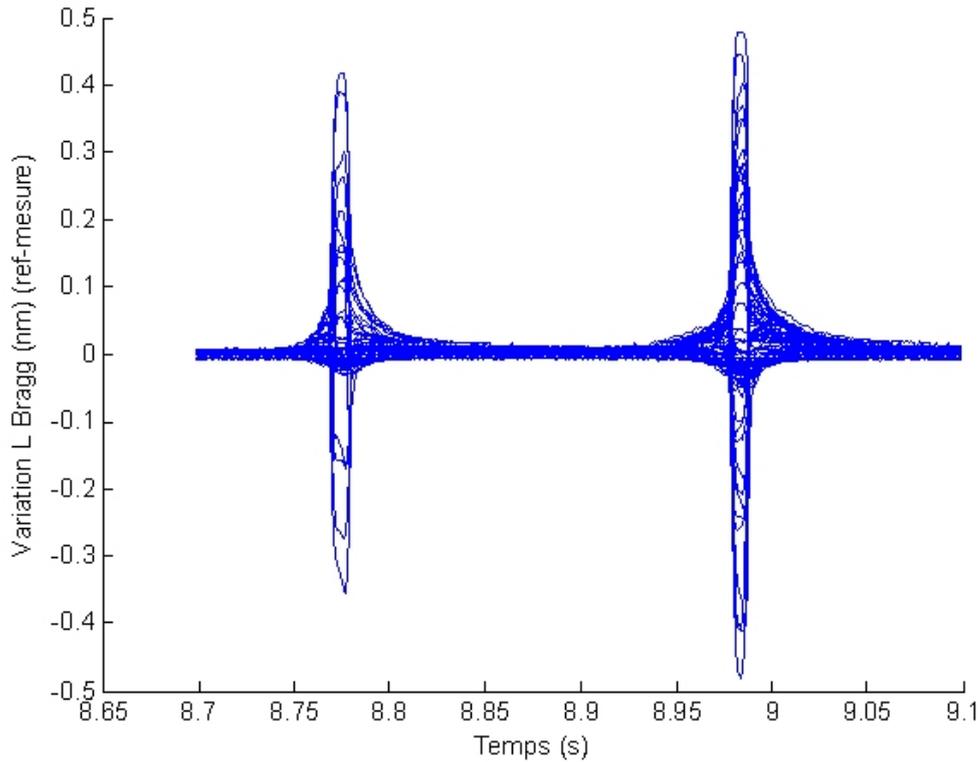


FIGURE D.16 – Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.

Les figures D.8 et D.15 servent à localiser la référence des longueurs d'onde du capteur et la mesure de celles-ci lors du passage d'un véhicule à une position physique, le long du capteur. D.8 et D.15 sont réalisées à partir de la moyenne des mesures de chaque longueur d'onde dans son ensemble. Elles n'apportent pas d'information utile pour localiser un véhicule mais servent à vérifier que chaque longueur d'onde correspond bien à sa propre référence, au bon endroit sur la fibre. Cependant, l'extraction des données de chaque essieu est difficilement lisible. L'isolement de chaque essieu facilite la lecture des différentes informations contenues dans ces figures.

D.3 Quelques mesures obtenues par l'action de l'essieu avant du camion de référence lors du 5^e passage

Les mesures suivantes sont extraites d'un passage du camion du LRPC d'Angers sur le capteur à fibres optiques n°1.

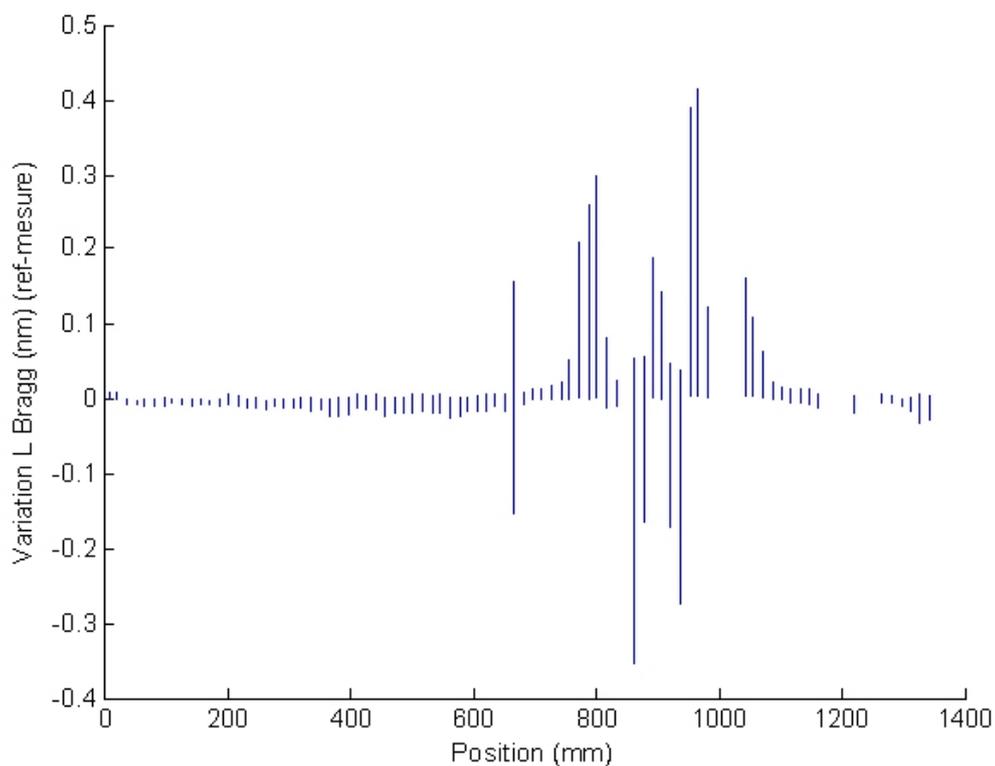


FIGURE D.17 – Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

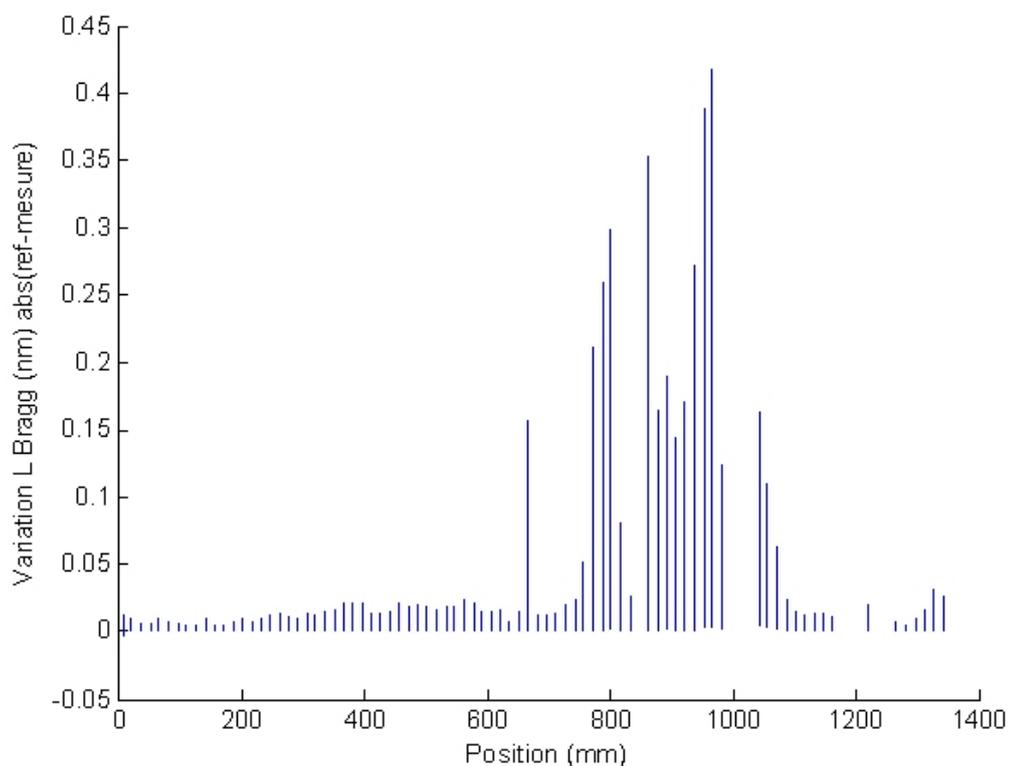


FIGURE D.18 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg |référence - mesure| sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

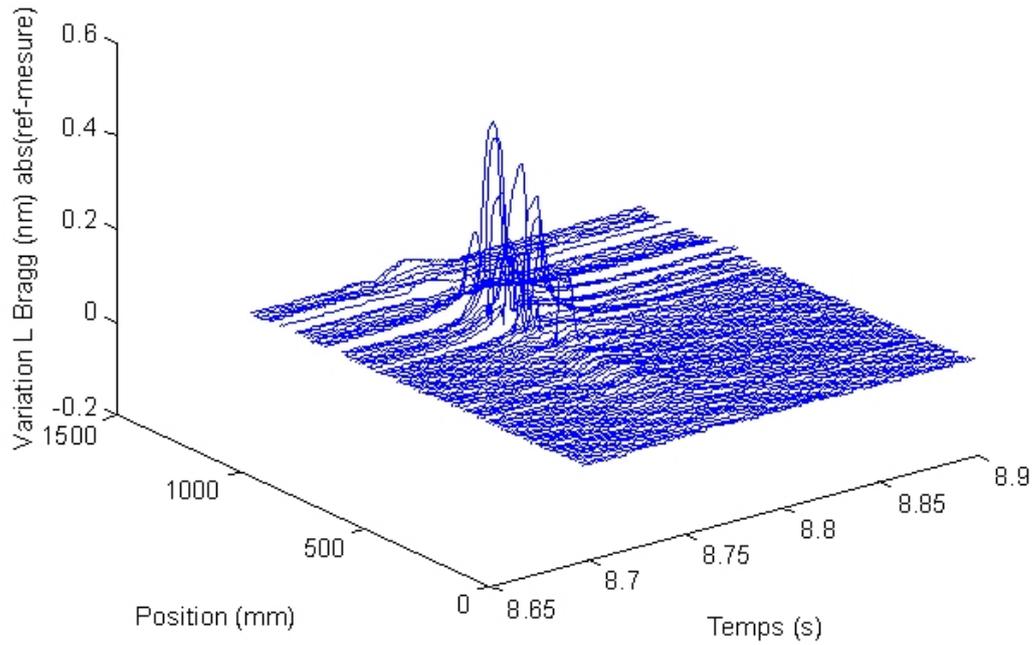


FIGURE D.19 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.

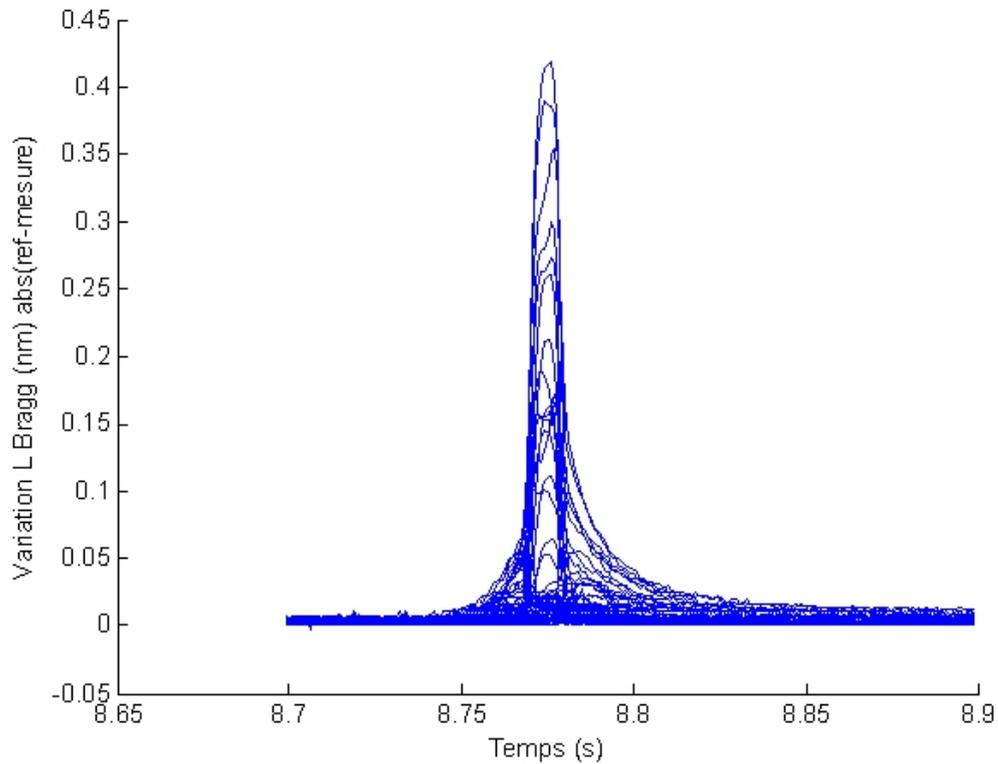


FIGURE D.20 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.



FIGURE D.21 – Passage 5 - Image extraite de la vidéo montrant le pneu avant droit sur le capteur à fibres optiques.

D.4 Quelques mesures obtenues par l'action de l'essieu arrière du camion de référence lors du 5^e passage

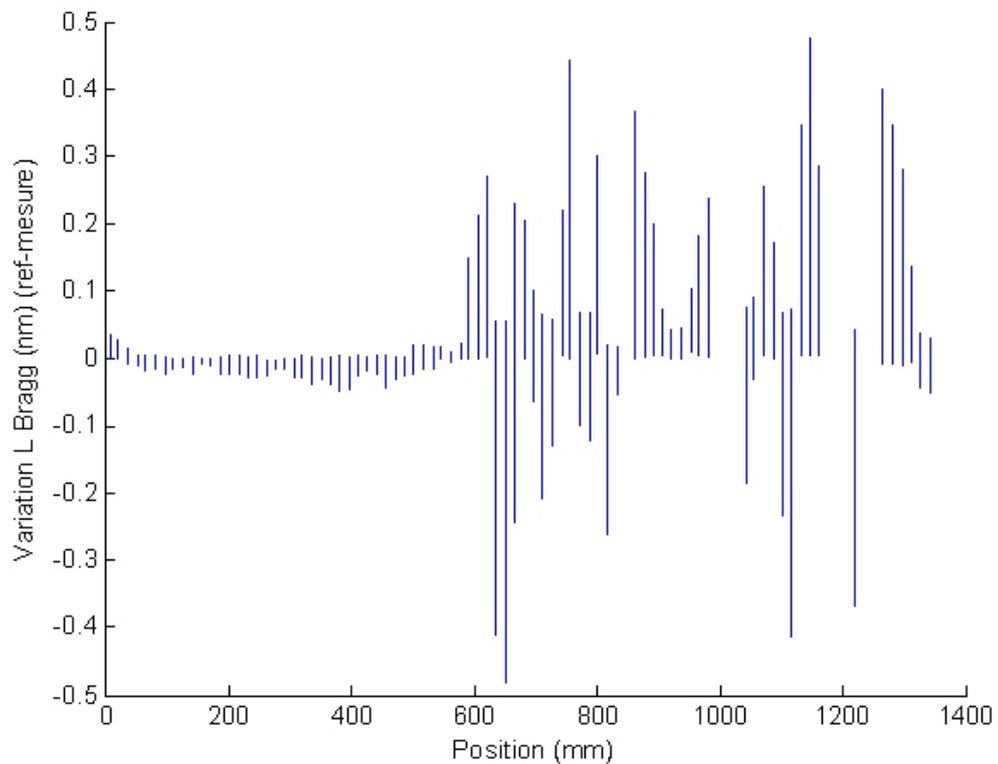


FIGURE D.22 – Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

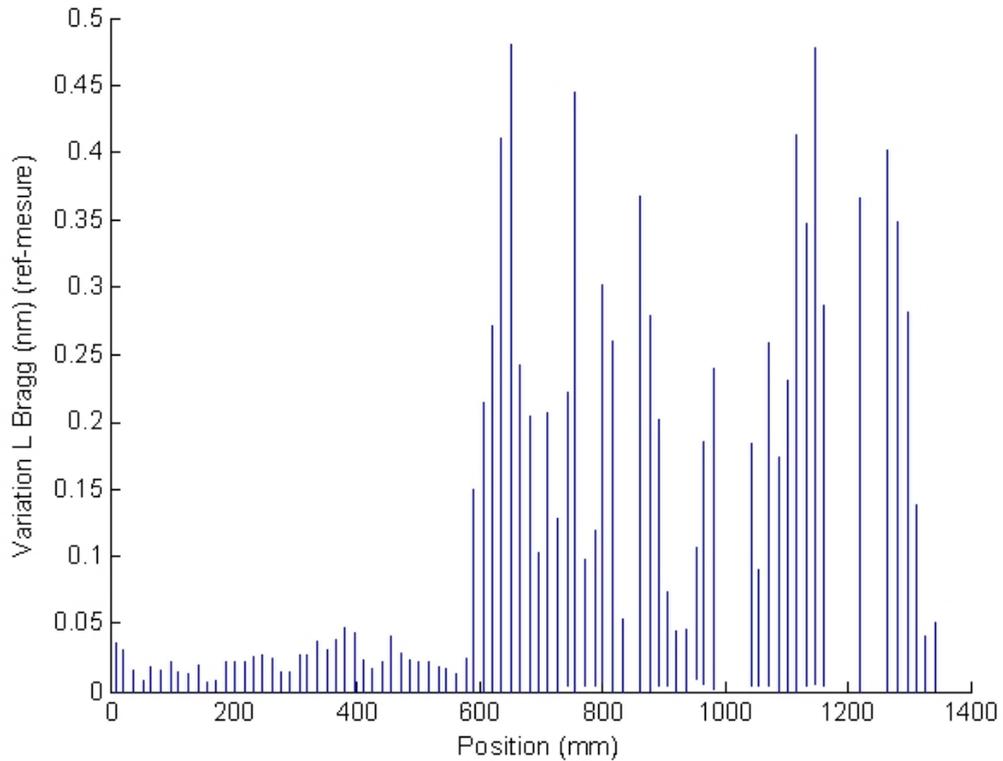


FIGURE D.23 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.

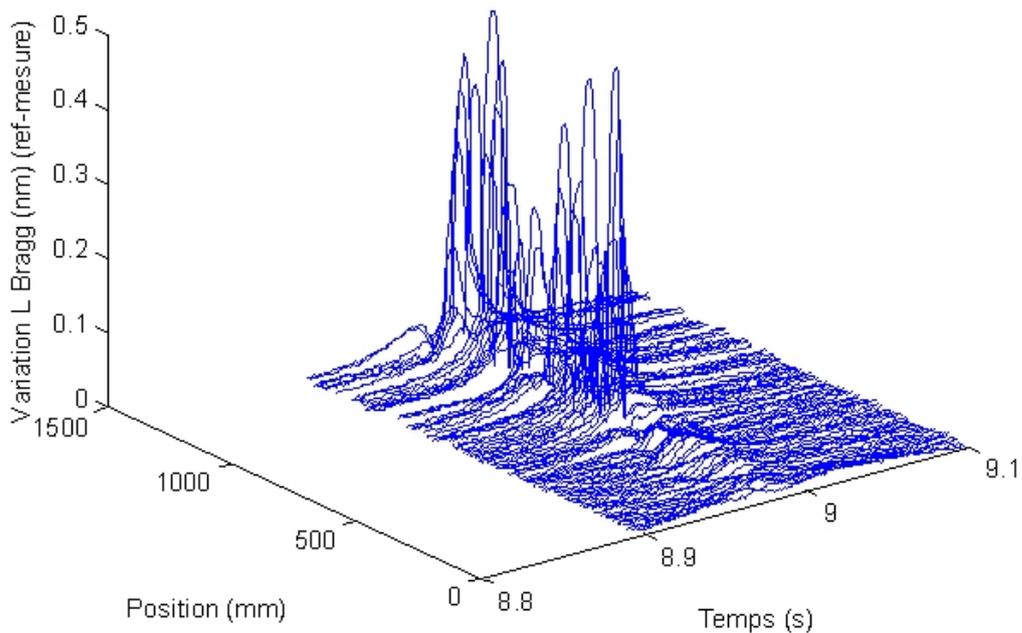


FIGURE D.24 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.

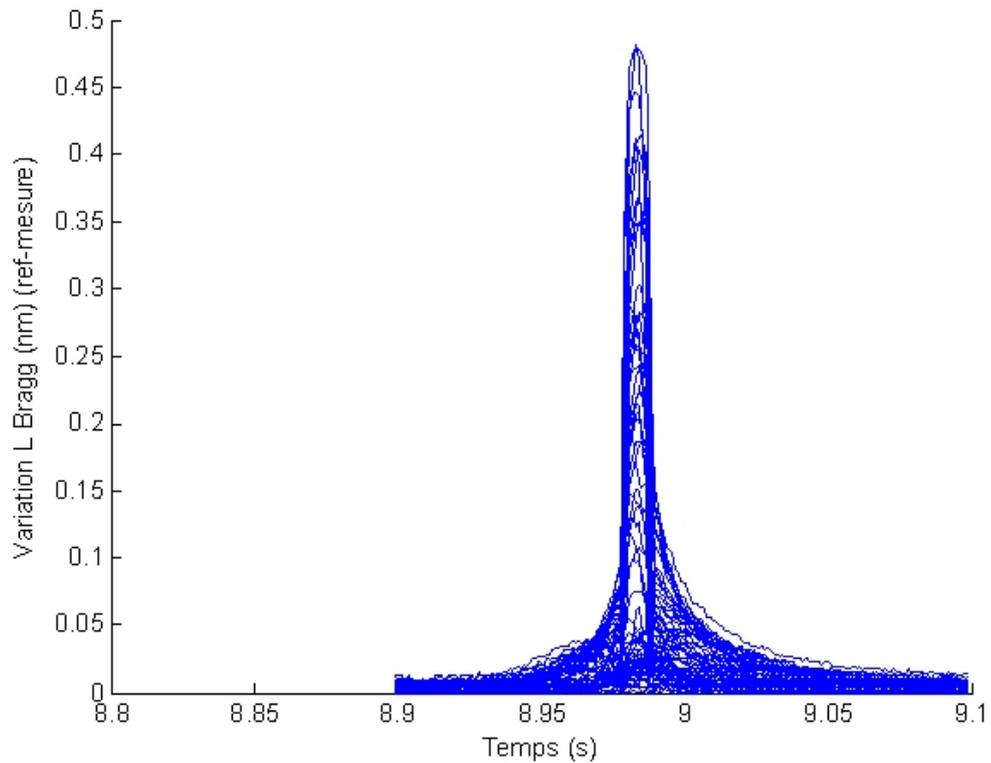


FIGURE D.25 – Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.

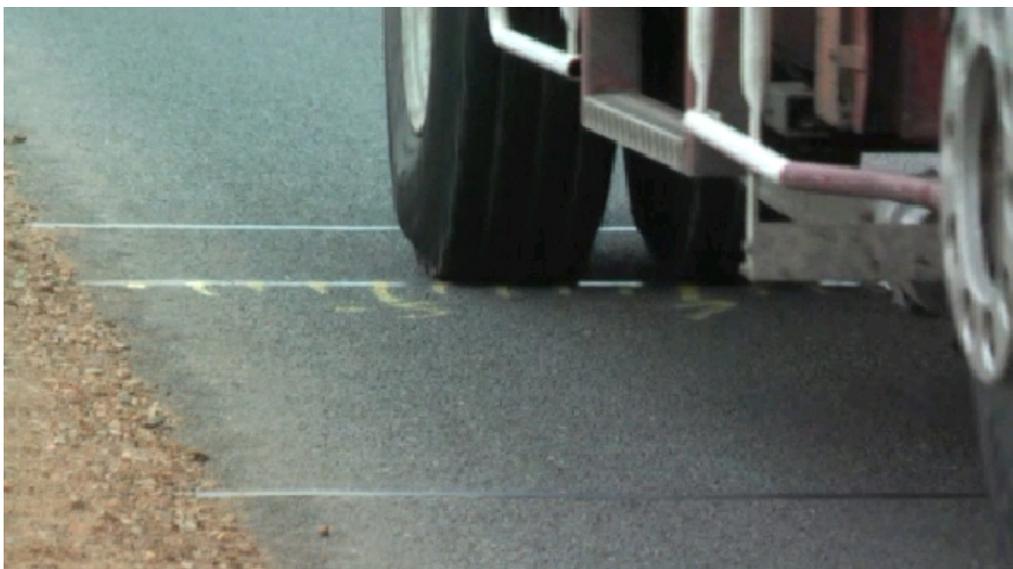


FIGURE D.26 – Passage 5 - Image extraite de la vidéo représentant l'essieu arrière sur le capteur à fibres optiques.

E.

Photos des expérimentations sur le site de Marans (49)

Les capteurs sont préalablement préparés aux seins du laboratoire (figure E.1).

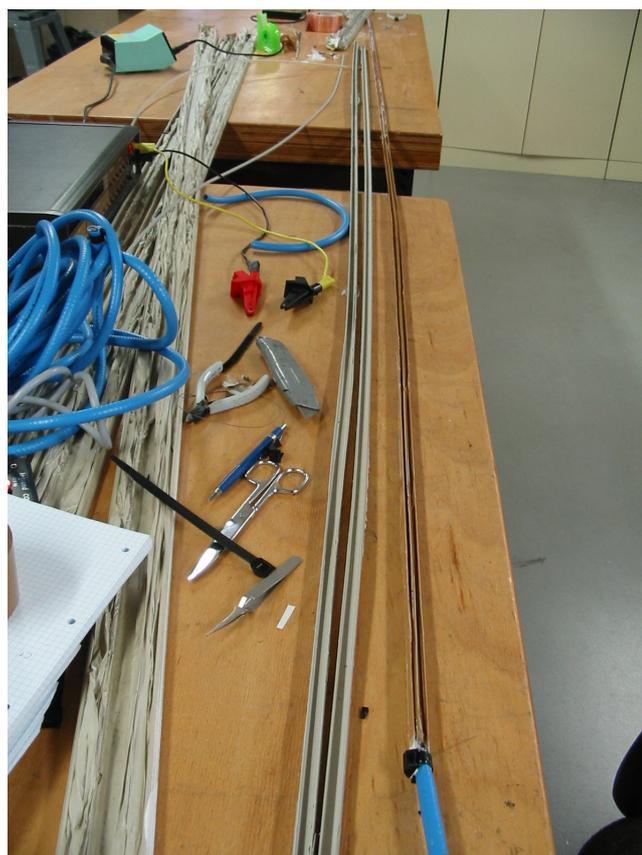


FIGURE E.1 – Préparation du capteur en laboratoire.

Des U ont servi de support pour poser le capteur. La hauteur d'installation du capteur dans la saignée est ainsi automatiquement réglée (figure E.2).



FIGURE E.2 – Un support en U de 2 cm de large environ.

Les photos suivantes sont extraites des mois de travaux sur le site pour mettre en place l'ensemble des capteurs.

Des saignées sont réalisées dans la chaussée de la route pour y introduire les différents capteurs (figure E.3).



FIGURE E.3 – Une saignée dans la chaussée de la route.

Avant d'utiliser la technique des supports en U, un réglage préalable de la profondeur de la résine était effectué comme le montre la figure E.4.



FIGURE E.4 – Réglage de la hauteur de la résine avant la pose du capteur résistif.

29 capteurs résistifs ont été installés de part et d'autre du sommet de côte (figure E.5).



FIGURE E.5 – Visualisation de la position des capteurs dans la chaussée dans le sens Marans vers Segré avant le sommet de côte. La résine a été coulée.

Chaque capteur possède sa propre carte électronique. Elle est installée dans un tube en PVC présent dans l'accotement. Ce tube est positionné dans le prolongement du capteur. L'ensemble est visible sur la figure E.6 et matérialisé par la présence de cônes de chantier.



FIGURE E.6 – Visualisation d'une partie des capteurs résistifs et du remblayage sur l'accotement.

Le système d'acquisition fondé sur un microcontrôleur est visible sur l'image E.7.

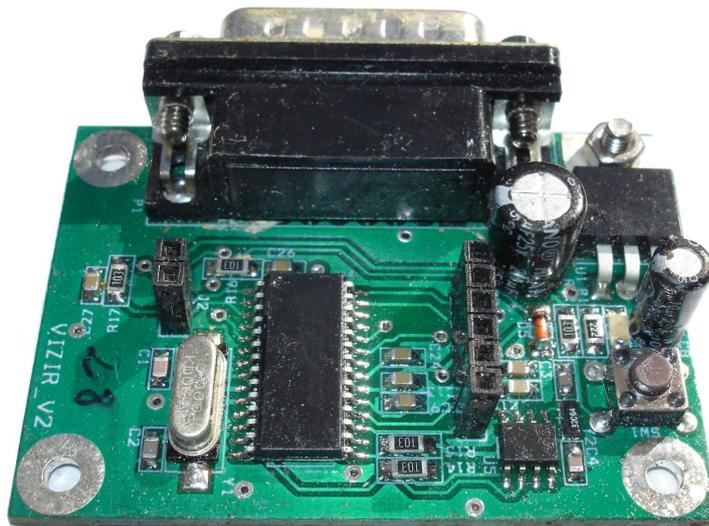


FIGURE E.7 – Photographie de la carte électronique du capteur résistif.

Les cartes électroniques sont logées dans des tubes en PVC installés à une profondeur de 80 cm et à une distance du bord de voie de 1,5 m. Un raccord en T est positionné pour qu'une partie de ce tube remonte en direction de chaque capteur installé. Ce prolongement de tube se situe à un mètre du bord de la chaussée et à 30 cm de profondeur directement à l'extrémité des capteurs (figure E.8).

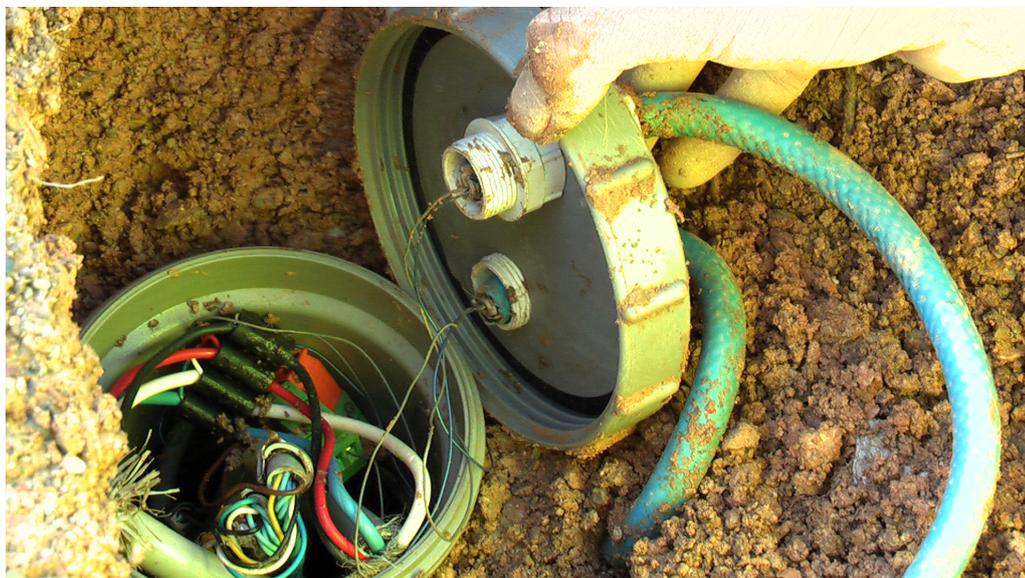


FIGURE E.8 – Photographie d'une remontée du tube en PVC contenant un noeud (carte électronique), les câbles électriques et deux arrivées de capteur (deux tuyaux traversant le couvercle, en bleu).

Après de nombreux passages sur la version de base du capteur résistif, un allongement d'une quinzaine de centimètres entraîne l'expulsion de la tige nylon vers l'extérieur E.9.

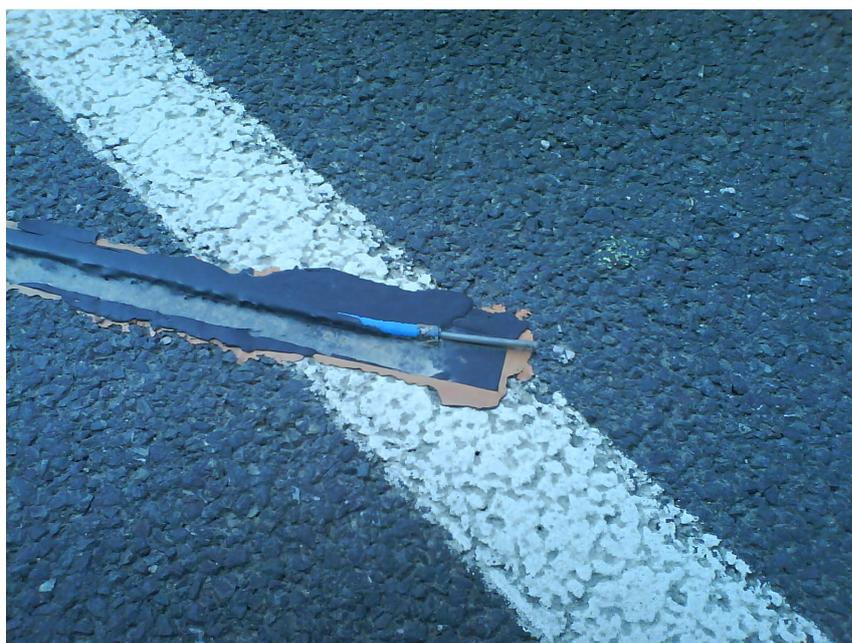


FIGURE E.9 – Allongement du capteur suite à de nombreux passages.

Plusieurs résines ont été expérimentées. La résine S3D vendue par la société Resipoly a une réaction exothermique suffisamment forte pour faire fondre le capteur résistif (figure E.10).

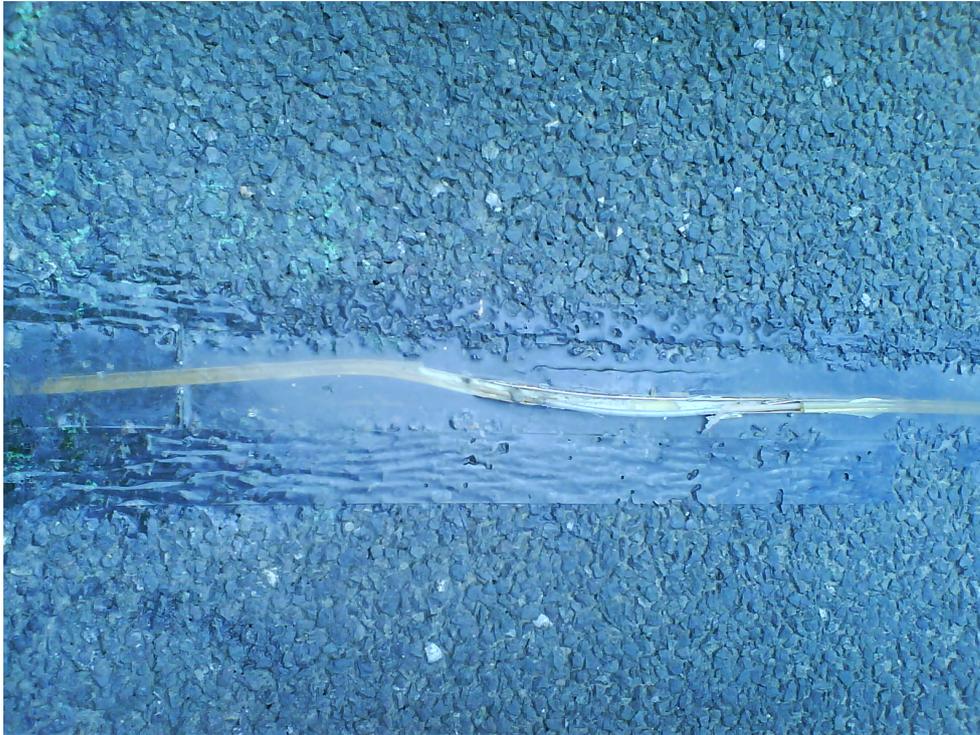


FIGURE E.10 – Test de la résine S3D sur la seconde version du capteur.

La seconde version du capteur, posé à l’affleurement de la surface de la route, est détériorée (figure E.11).



FIGURE E.11 – Dégradation prématurée du capteur résistif amélioré.

Lors des mesures statiques, la route n'était pas encore ouverte à la circulation. Cela a permis d'installer facilement le matériel E.12. En effet, la Direction Départementale de l'Équipement du Maine-et-Loire (49) a mis en place un alternat, ou une déviation selon les besoins, pour permettre l'installation des capteurs en toute sécurité. Les interventions sur site ont, bien évidemment, été effectuées dans le plus grand respect des règles de sécurité !

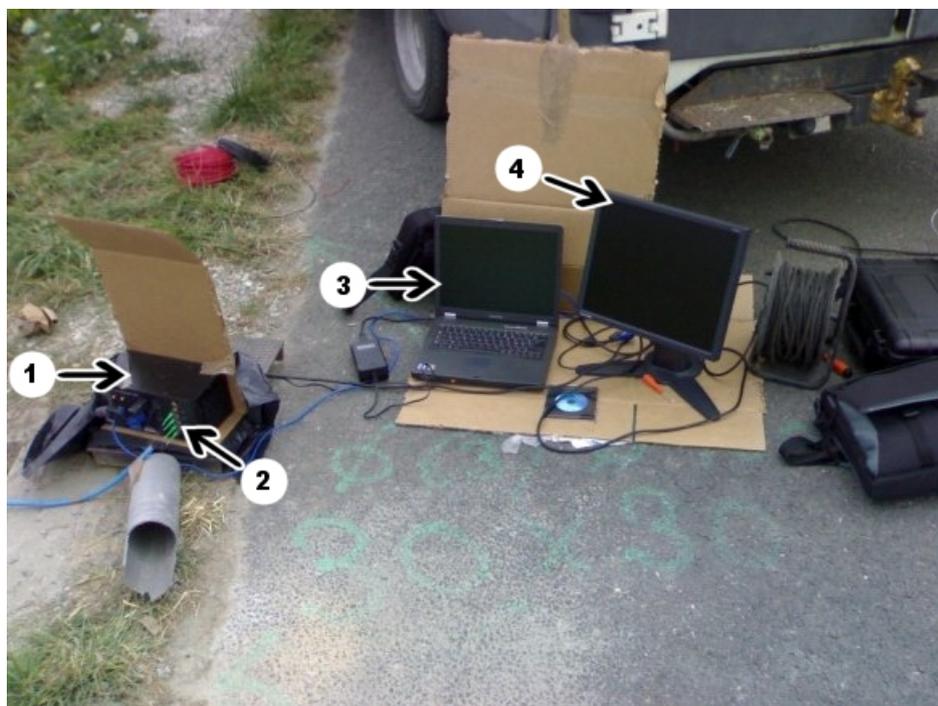


FIGURE E.12 – Matériel utilisé lors de l'interrogation des capteurs à réseaux de Bragg : 1 - interrogateur à réseaux de Bragg ; 2 - arrivée des fibres optiques ; 3 - portable pour le recueil des données ; 4 - écran optionnel de contrôle de l'interrogateur.

F.

Publications

Cette partie regroupe l'ensemble des productions scientifiques réalisées dans le cadre de ces travaux de doctorat.

F.1 Les brevets

PLAINCHAULT, P., AUBIN, S.. (17 avril 2009). Dispositif de détection de la position d'un objet dans une zone et système de détermination de la position d'un objet dans une zone qui utilise un ou plusieurs de tels dispositifs de détection. France. FR2922352 (A1).

F.2 Les revues

BRIAND, P., ANCEAUX, F., AUBERLET, J-M., AUBIN, S., PACAUX, M-P, PLAINCHAULT, P., ROSEY, F. (2010). Impact of perceptual treatments on driver's behaviour : from the driving simulators studies to the field tests - first results. *Transportation Research Board of the national academies (TRB 2010)*.

F.3 Les conférences avec Actes

PLAINCHAULT, P., AUBIN, S., BRIAND, P., AUBERLET, J.M., BOSCH, T. (2010). Des capteurs enfouis pour l'analyse du comportement des conducteurs. *C2I 2010, 5ème Colloque Interdisciplinaire en Instrumentation, Le Mans (France)*.

AUBIN, S., IENG, S-S., PLAINCHAULT, P., AUBERLET, J-M., BOSCH, T. (2008). Capteurs coopératifs pour un observatoire de trajectoire. *In Proceedings of : 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)*, Bucarest (Roumanie).

AUBIN, S., PLAINCHAULT, P., BOSCH, T. (2006a). Fiber bragg grating to observe displacement/positioning. *In 5th Topical Meeting on Optoelectronic distance / Displacement Measurements and applications (ODIMAP) V*, pages 241-246, Madrid (Spain). ISBN : 84-690-0938-9.

AUBIN, S., PLAINCHAULT, P., IENG, S-S. AUBERLET, J-M. (2006b). Sensor technologies to follow vehicles for ITS. *ITS Telecommunications Proceedings, 6th international conference on ITST*, pages 870-873, Chengdu (China). ISBN : 0 7803 9587 5.

F.4 Les communications orales

F.4.1 Les affiches

AUBIN, S., PLAINCHAULT, P., BOSCH, T. (2008). Capteurs coopératifs pour le suivi de trajectoires. *Journée de l'école doctorale GEET 2008*, poster, Toulouse (France).

AUBIN, S., IENG, S-S., PLAINCHAULT, P., BERTRAND, J., AUBERLET, J-M., STEPHANT, A. (2006). VIZIR : haut de côte et ligne droite. *3e congrès sur les Systèmes de transports Intelligents*, poster, St Briec (France).

F.4.2 Les séminaires

PLAINCHAULT, P., BRIAND, P., AUBIN, S., LE BASTARD, C., J., AUBERLET, J.M., STEPHAN, A., CALDIRONI, D. (2008). Observatoire de trajectoires sur une route en ligne droite avec sommets de côte. *3e séminaire SARI*. France.

ROSEY, F., AUBERLET, J.M., AUBIN, S., BERTRAND, J., DUPRÉ, G., MENACER, O., MOISAN, PLAINCHAULT, P., O., STEPHAN, P. (2008). Aménagements perceptifs et contrôle de trajectoire : positionnement et charge mentale. *Séminaire Trajectoires et Sécurité routière*, France.

AUBIN, S., IENG, S.S., PLAINCHAULT, P., BERTRAND, J., AUBERLET, J.M., CAILLOT, S. (2006). Observatoire de trajectoires sur une route en ligne droite avec sommets de côte. *2e séminaire LCPC : Trajectoires et sécurité routière*. France.

ROSEY, F., AUBERLET, J.M., AUBIN, S., PLAINCHAULT, P., BERTRAND, J. (2006). Situation de conduite simulée en sommet de côte : étude du positionnement latéral, *2e séminaire LCPC : Trajectoires et sécurité routière*. France.

Table des figures

1	Présentation des échanges dans les ITS.	4
2	Les différentes unités d'un capteur intelligent.	4
1.1	Les grands enjeux.	12
4.1	Une disposition possible d'un système vidéo, ici à l'avant du véhicule.	21
4.2	Le système FRAO.	22
4.3	Représentation de configurations possibles pour l'installation des tubes pneumatiques, source [Klein et Kelley, 1996].	25
4.4	Capteur de trafic piézo-électrique à quartz (capteur Lineas de chez Kistler).	26
4.5	Exemple d'installation de deux capteurs extensométriques avec en amont et en aval deux boucles électromagnétiques (A : alignés entre les boucles, B : en quinconce, C : tout seul), source International Road Dynamics (IRD) Inc.	27
4.6	Présentation d'un capteur « bending plate », source ORNL.	27
4.7	Présentation du capteur de force, source Oak Ridge National Laboratory (ORNL).	28
4.8	Système à fibre optique, source [SETRA/CSTR, 1995].	28
4.9	Configuration des capteurs suivant le mode barrage.	30
4.10	Configuration des capteurs suivant le mode reflex.	30
4.11	Configuration des capteurs suivant le mode de proximité.	30
4.12	Positionnement d'un capteur en mode de proximité (ici ce capteur utilise une technologie fondée sur les ultrasons, cf. paragraphe 4.3.2.4 page 31).	31
4.13	Dispositif à base d'un capteur à infrarouge passif.	33
4.14	Représentation de l'influence d'un véhicule sur les lignes de champ terrestre.	34

TABLE DES FIGURES

4.15	Positionnement d'un capteur magnétique.	34
4.16	Composition d'un système à boucle magnétique.	35
4.17	Capteur acoustique passif présentant des matrices de microphone.	37
4.18	Champ de détection du Lidar installé sur le devant d'un véhicule.	37
4.19	Codeur absolu ou de position à 16 segments.	38
4.20	Tachymètre optique.	39
4.21	Présentation d'une centrale inertielle.	40
4.22	Système de localisation à base de magnets.	41
4.23	Guidage par un fil lumineux d'un véhicule minier de 50 tonnes.	41
4.24	Application d'un système RFID pour la prévention routière.	42
4.25	Positionnement par GNSS.	44
6.1	Représentation de la surface de contact entre la roue et le sol.	56
7.1	Quelques topologies de réseaux.	59
7.2	Principe de fonctionnement d'un réseau de Bragg.	60
7.3	Inscription des réseaux de Bragg par masque de phase (à gauche) ou par interférométrie (miroir de Lloyd à droite).	62
7.4	Profils d'indice des réseaux de Bragg.	63
7.5	Exemple d'un spectre réfléchi d'un réseau de Bragg.	64
7.6	Principe de fonctionnement de trois réseaux de Bragg.	68
7.7	Système idéal à réseaux de Bragg pour une largeur de voie de 3 m.	71
7.8	Présentation du système réel optiques à réseaux de Bragg.	73
7.9	Interrogateur à réseaux de Bragg de chez Smart Fibres Ldt utilisé pour les manipulations.	75
7.10	Présentation des longueurs d'onde en fonction de la position sur la fibre n°1 (à gauche) et la fibre n°2 (à droite).	76
7.11	Présentation des longueurs d'onde en fonction de la position des quatre fibres constituant le capteur à fibres optiques à réseaux de Bragg.	77

7.12	Représentation des variations maximales de différentes longueurs d'onde présentes sur le début de la fibre n°1.	78
7.13	Représentation des temps mesurés suite à l'excitation d'un objet en mouvement sur le capteur.	79
7.14	Variations des longueurs d'onde de 24 réseaux de Bragg présents sur deux fibres différentes ($\lambda_{b-AVEC-resine} - \lambda_{b-SANS-resine}$).	80
7.15	Ecarts successifs entre les longueurs d'onde de Bragg des réseaux présents sur deux fibres avant (à gauche) et après (à droite) le conditionnement du capteur dans de la résine.	81
8.1	Schématisation du capteur résistif.	86
8.2	Coupe de face du capteur avant (figure gauche) et après contrainte (figure droite).	86
8.3	Architecture matérielle de la carte d'acquisition.	87
8.4	Etude des mesures en sortie du CAN de deux capteurs par des appareils différents (carte électronique, échelle de gauche et ohmmètre, échelle de droite) en fonction de la position du point d'impact sur le capteur.	89
8.5	Erreur de mesure de la position liée à l'utilisation de la droite de régression linéaire pour la mesure effectuée avec la carte électronique (en losange bleu) et pour la mesure effectuée à l'ohmmètre (en carré rouge).	90
8.6	Schéma du modèle d'une ligne de transmission à constantes localisées.	93
8.7	Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre ($1/A$) sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein et la partie obtenue par le modèle à constantes localisées est en rouge, trait discontinu.	97
8.8	Présentation d'une ligne à constantes uniformément réparties.	98
8.9	Cellule de base utilisée dans notre modèle de ligne de transmission.	99
8.10	Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre ($1/A$) sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein, et la partie obtenue par le modèle est en rouge, trait discontinu.	101
8.11	Représentation de la partie réelle (en haut à gauche), imaginaire (en bas à gauche), absolue (en haut à droite) et angulaire (en bas à droite) du paramètre B sur le capteur de 3 m de long. La partie mesurée est en bleu, trait plein, et la partie obtenue par le modèle est en rouge, trait discontinu.	102

TABLE DES FIGURES

8.12 Réponse impulsionnelle du capteur de 3 m.	103
8.13 Vitesse de groupe obtenue par le modèle (en haut) et par la dérivée de la mesure de phase (en bas).	104
8.14 Modèle électrique équivalent du capteur.	105
8.15 Schéma électrique équivalent du capteur en basse fréquence.	106
8.16 Evolution de la résistance en fonction de la température pour différentes positions.	107
8.17 Evolution de la résistance linéique en fonction de la température pour différentes positions.	108
8.18 Variations de la résistance par rapport à la résistance de référence prise à 25 °C en fonction de la température du capteur seul et pour différentes positions.	109
8.19 Variations entre la tension Zener acquise par le CAN 10 bits à 25 °C et celles prises à différentes températures.	110
8.20 Evolution des tensions d'alimentation de la carte en sortie du régulateur et de la tension au borne de la diode Zener en fonction de la température, l'ensemble est mesuré à l'oscilloscope numérique.	110
8.21 Présentation de la manipulation : le capteur et son électronique sont dans l'étuve.	111
8.22 Variations en nombre de bits de la résistance du capteur entre la référence à 25 °C et les acquisitions à différentes températures. Ces variations sont mesurées par la carte électronique placée avec le capteur dans une étuve.	112
8.23 Représentation des variations du nombre de bits du modèle général et du modèle - capteur et électronique - en fonction de la température. L'erreur commise par l'usage du modèle général par rapport au modèle - capteur et électronique - est également tracée (différence entre les deux modèles).	113
8.24 Temps de réponse mécanique du capteur suite à une impulsion : à gauche la réponse de l'impulsion, et, à droite, un zoom sur la première partie de la réponse à l'impulsion.	114
9.1 Schéma du capteur à fibres optiques enfoui dans la chaussée de la route. 1 - fibres optiques (grossies cent fois), 2 - résine, 3 - profilé PVC en forme de U, 4 - support du capteur pour l'installation à la hauteur désirée sur la route, 5 - bitume.	120
9.2 Exemple d'installation d'un capteur résistif dans la chaussée.	121
9.3 Schéma de présentation générale des expérimentations.	122
9.4 Camion du LRPC d'Angers.	123

10.1 Relevé des longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 1 pour la référence sans véhicule (+) et lorsque la contrainte exercée par l'essieu avant du véhicule appui sur le capteur sans déplacement (x) en fonction de la position sur ce capteur.	127
10.2 Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position de la roue sur ce capteur.	128
10.3 Relevé des longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 pour la référence sans véhicule (+) et lorsque la contrainte exercée par l'essieu avant du véhicule appui sur le capteur sans déplacement (x) en fonction de la position sur ce capteur.	130
10.4 Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 2 en fonction de la position sur ce capteur.	130
10.5 Relevé des variations de longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière, marche avant) en fonction de sa position le long du capteur avec à gauche le relevé réel et à droite le relevé suite à un changement de la référence.	132
10.6 Relevé des longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction du temps.	133
10.7 Relevé des variations de longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction de la position le long du capteur et du temps.	133
10.8 Relevé des variations de longueurs d'onde de Bragg centrales sur CFO 2 d'une voiture circulant à faible vitesse (manoeuvre marche avant, marche arrière) en fonction du temps.	134
10.9 Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction du temps.	135
10.10 Passage 1 - Variations en valeur absolue des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg, référence - mesure sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps.	136
10.11 Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	138
10.12 Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	138

TABLE DES FIGURES

10.13	Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.	139
10.14	Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.	139
10.15	Passage 1 - Image extraite de la vidéo montrant le pneu avant droit sur le capteur à fibres optiques.	140
10.16	Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	142
10.17	Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	142
10.18	Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.	143
10.19	Passage 1 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.	143
10.20	Passage 1 - Image extraite de la vidéo représentant l'essieu arrière sur le capteur à fibres optiques.	144
11.1	Acquisition du signal électrique en sortie de l'électronique de conditionnement avec l'oscilloscope numérique lors d'un passage à 30 km/h de la voiture de test et à une position de 1,70 m par rapport au repère de référence du capteur. . . .	150
11.2	Acquisition lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur à 30 km/h à une position latérale de 60 cm mesurée à l'oscilloscope numérique.	151
11.3	Acquisition lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur à 35 km/h à une position latérale de 1,10 m avec le système d'acquisition.	152
11.4	Acquisition lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur à 35 km/h avec un oscilloscope numérique.	152
11.5	Approche du véhicule sur le capteur suivant un angle α	153
11.6	Evolution de la position de chaque pneu séparément en fonction du temps ; En bleu trait continu : l'empreinte de P1 et en rouge trait discontinu : l'empreinte de P2 (schéma 11.5).	154

11.7	Évolution de la position de l'essieu avant du véhicule de test en fonction du temps pour plusieurs configurations d'angle d'inclinaison du capteur.	155
11.8	Temps de réponse mécanique du capteur résistif conditionné dans de la résine mesuré à l'aide d'un oscilloscope numérique avec à gauche une sollicitation réalisée par une massette, au centre un zoom sur la transition descendante et à droite une sollicitation réalisée avec un maillet.	156
11.9	Topologie du réseau sur le site de Marans.	157
11.10	Signature d'un camion sur le capteur n°22.	161
A.1	Constitution d'une fibre optique.	176
A.2	Exemple de différents profils d'indice (variation de l'indice n en fonction de r , distance par rapport à l'axe de la fibre).	177
B.1	Signal optique diffracté lors de la traversée d'un prisme.	183
B.2	Echantillonnage de la longueur d'onde après un prisme.	183
B.3	Détection de la longueur d'onde de Bragg par filtre passif.	184
B.4	Exemple d'interfranges pour deux fentes d'Young.	185
B.5	Dispositif fibré reprenant le principe de l'interféromètre de Michelson.	186
B.6	Dispositif fibré reprenant le principe de l'interféromètre de Mach-Zehnder.	186
B.7	Présentation de la cavité Fabry-Perot.	187
B.8	Analyseur de spectre optique à réseau de diffraction.	188
C.1	Spécification de la Norme Française E 03-001.	189
D.1	Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur la fibre n°2 de CFO1 en fonction du temps.	192
D.2	Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction du temps, lors du passage d'un véhicule.	192
D.3	Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction de la position physique du réseau et du temps.	193
D.4	Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de la fibre n°2 sur CFO1 en fonction de la position physique du réseau.	193

TABLE DES FIGURES

D.5 Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg. 194

D.6 Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps. . . 195

D.7 Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps. 195

D.8 Passage 1 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de référence '+' et mesurées 'x' sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg. 196

D.9 Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps. 196

D.10 Passage 1 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg, abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps. 197

D.11 Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg. 197

D.12 Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction du temps. 198

D.13 Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps. . . 198

D.14 Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg et du temps. 199

D.15 Passage 5 - Longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg de référence '+' et mesurées 'x' sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux de Bragg. 199

D.16 Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps. 200

D.17 Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux. 201

D.18 Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg |référence - mesure| sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux. 201

D.19	Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.	202
D.20	Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.	202
D.21	Passage 5 - Image extraite de la vidéo montrant le pneu avant droit sur le capteur à fibres optiques.	203
D.22	Passage 5 - Variations des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg (référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	203
D.23	Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux.	204
D.24	Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction de la position physique des réseaux et du temps.	204
D.25	Passage 5 - Valeur absolue de la variation des longueurs d'onde centrales des différents réseaux de Bragg abs(référence - mesure) sur CFO 1 en fonction du temps.	205
D.26	Passage 5 - Image extraite de la vidéo représentant l'essieu arrière sur le capteur à fibres optiques.	205
E.1	Préparation du capteur en laboratoire.	207
E.2	Un support en U de 2 cm de large environ.	208
E.3	Une saignée dans la chaussée de la route.	208
E.4	Réglage de la hauteur de la résine avant la pose du capteur résistif.	209
E.5	Visualisation de la position des capteurs dans la chaussée dans le sens Marans vers Segré avant le sommet de côte. La résine a été coulée.	209
E.6	Visualisation d'une partie des capteurs résistifs et du remblayage sur l'accotement.	210
E.7	Photographie de la carte électronique du capteur résistif.	210
E.8	Photographie d'une remontée du tube en PVC contenant un noeud (carte électronique), les câbles électriques et deux arrivées de capteur (deux tuyaux traversant le couvercle, en bleu).	211

TABLE DES FIGURES

E.9	Allongement du capteur suite à de nombreux passages.	211
E.10	Test de la résine S3D sur la seconde version du capteur.	212
E.11	Dégradation prématurée du capteur résistif amélioré.	212
E.12	Matériel utilisé lors de l'interrogation des capteurs à réseaux de Bragg : 1 - interrogateur à réseaux de Bragg ; 2 - arrivée des fibres optiques ; 3 - portable pour le recueil des données ; 4 - écran optionnel de contrôle de l'interrogateur. .	213

Liste des tableaux

5.1	Tableau présentant les avantages et inconvénients des différents capteurs et l'information mesurée.	50
7.1	Comparatif des techniques d'interrogation d'un réseau de Bragg.	67
8.1	Résultats de la méthode des moindres carrés pour l'identification des paramètres r , α , l et c	101
8.2	Résultats des mesures des temps de délai et de propagation pour différentes tailles de capteurs.	103
10.1	Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l'essieu avant lors des passages 1 et 5.	137
10.2	Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l'essieu arrière lors des passages 1 et 5.	141
10.3	Relevé des mesures de CFO n°2 et de la caméra pour l'essieu avant lors des passages 14 et 19.	145
10.4	Relevé des mesures des capteurs à fibres optiques et de la caméra pour l'essieu arrière lors des passages 19 (90 km/h) et 14 (50 km/h).	146
11.1	Relevé des positions par la carte d'acquisition électronique lors du second passage.	149
11.2	Relevé des positions par la carte d'acquisition électronique lors du second passage.	151
11.3	Relevé des positions par la carte d'acquisition électronique lors d'un passage de la voiture de test sur le capteur 22.	158
11.4	Relevé de positions incohérentes par le système d'acquisition électronique.	159
11.5	Relevé de positions par le système d'acquisition électronique suite à des allers et retours de la voiture de test sur le second capteur résistif (n°24).	160

LISTE DES TABLEAUX

12.1 Bilan des deux capteurs développés comparés avec les boucles électromagnétiques	166
A.1 Caractéristiques optiques des différents connecteurs.	180

Bibliographie

- [AeroSys *et al.*, 1995] AEROSYS, L., LULL, I. G. J. ., EDWARDS et KELCEY (1995). Surveillance requirements/technology. Rapport technique, I-95 Corridor Coalition. Final project report, project n°3 (95-003), I-95 CC3-95-06.
- [Aldon, 2001] ALDON, M.-J. (2001). Capteurs et méthodes pour la localisation des robots mobiles. Rapport technique, Techniques de l'Ingénieur. S 7 852.
- [Alessandretti, 2003] ALESSANDRETTI, G. (2003). New technologies for vehicles. Rapport technique, Technical Report of the CyberCars Project (Cybernetic Cars for a New Transportation System in the Cities). Deliverable D2.
- [Algarra, 2006] ALGARRA, L. (2006). Document de définition de sari. Rapport technique, erdyn. Disponible sur le site de SARI : <http://sari.prd.fr/>, valide au 18 août 2009.
- [America, 2009] AMERICA, I. (2009). <http://www.itsa.org>, valide au 18 septembre 2009.
- [Amoros, 2007] AMOROS, E. (2007). *Estimation de la population réelle des victimes d'accidents de la route et de son bilan lésionnel, au niveau du département du Rhône et au niveau national*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- [Asch *et al.*, 1998] ASCH, G. *et al.* (1998). *Les capteurs en instrumentation industrielle*. Dunod. ISBN 2 10 003773 0.
- [Aubin *et al.*, 2008] AUBIN, S., IENG, S.-S., PLAINCHAULT, P., AUBERLET, J.-M. et BOSCH, T. (2008). Capteurs coopératifs pour un observatoire de trajectoire. In *Proceedings of : 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA)*, Bucarest (Roumanie).
- [Aubin *et al.*, 2006a] AUBIN, S., PLAINCHAULT, P. et BOSCH, T. (2-4 oct. 2006a). Fiber bragg grating to observe displacement/positioning. In *5th Topical Meeting on Optoelectronic Distance / Displacement Measurements and Applications (ODIMAP) V*, pages 241–246, Madrid (Spain). ISBN : 84-690-0938-9.
- [Aubin *et al.*, 2006b] AUBIN, S., PLAINCHAULT, P., SONG, S.-S. et AUBERLET, J.-M. (2006b). Sensor technologies to follow vehicles for its. *ITS Telecommunications Proceedings, 6th international conference on ITST*, pages 870–873. ISBN : 0 7803 9587 5.
- [Barsanescu *et al.*, 2007] BARSANESCU, P., CARLESCU, P. et MIHAI STEFANESCU, D. (2007). A new weigh-in-motion and traffic monitoring system. In *20th Conference on Measurement of Force, Mass and Torque (together with 3rd Conference on Pressure Measurement*

BIBLIOGRAPHIE

and 1st Conference on Vibration Measurement), International Measurement Confederation (IMEKO).

- [Bertrand, 1998] BERTRAND, D. (1998). Principe de fonctionnement de spectromètres proche infrarouge de conception récente. Rapport technique 4, Analysis magazine.
- [Bertrand et Dicko, 2000] BERTRAND, J. et DICKO, M. (2000). Procédé et dispositif pour classer des véhicules en catégories de silhouettes et pour déterminer leur vitesse à partir de leur signature électromagnétique. LCPC, Alcatel/Parcomatic. brevet n°00.009189.
- [Billard, 2008] BILLARD, J. (2008). Abrégé d'histoire des routes. LCPC.
- [Borenstein *et al.*, 1996] BORENSTEIN, J., EVERETT, H. et FENG, L. (1996). Where am i ? sensors and methods for mobile robot positioning. Rapport technique, university of Michigan.
- [Borenstein *et al.*, 1997] BORENSTEIN, J., EVERETT, H., FENG, L. et WEHE, D. (1997). Mobile robot positioning & sensors and techniques. *Invited paper for the Journal of Robotic Systems, Special Issue on Mobile Robots*, 14(4):231–249.
- [Brosseaud, 2003] BROSSEAUD, Y. (2003). Les constituants des matériaux des chaussées. LCPC. Stage Projet de Fin d'Etudes.
- [CARSENSE, 2003] CARSENSE, P. (2003). <http://www.carsense.org>.
- [Cen *et al.*, 1997] CEN, L. R., BENJAMIN, S. D., E., S. P. W. et E., S. J. (1997). Ultrashort pulse reflection from fiber gratings : a numerical investigation. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1503–1512.
- [Chan *et al.*, 2002] CHAN, C., BOUGLER, B., NELSON, D. *et al.* (2002). Characterization of magnetic tape and magnetic markers as a position sensing system for vehicle guidance and control. *Proceedings of American Control Conference*, 1(6):95–99. ISBN : 0-7803-5519-9.
- [Chan *et al.*, 2000] CHAN, P. K. C., JIN, W. et SULEYMAN DEMOKAN, M. (2000). Fmcw multiplexing or fiber bragg grating sensors. *IEEE Journal on Quantum electronics*, 6(5): 1077–1084.
- [Chapelon, 2005] CHAPELON, J. (2005). La sécurité routière en france, bilan de l'année 2004. Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière.
- [Chapelon, 2008a] CHAPELON, J. (2008a). Les perspectives de progrès de la sécurité routière au cours des cinq prochaines années. Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière.
- [Chapelon, 2008b] CHAPELON, J. (2008b). La sécurité routière en france, bilan de l'année 2007. Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière.
- [Chartier *et al.*, 2003] CHARTIER, T., MARTEL, G. et LE BOUDEC, P. (2003). Manuel d'utilisation, fibres optiques. Rapport technique, I.D.I.L. Fibres Optiques.
- [Cheung *et al.*, 2004] CHEUNG, S. Y., COLERI, S., DUNDAR, B., GANESH, S., TAN, C.-W. et VARAIYA, P. (2004). Traffic measurement and vehicle classification with a single magnetic sensor. *In 84th Annual Meeting Transportation Research Board January 2005*, Washington D.C.

-
- [Chi Shing, 2005] CHI SHING, C. (2005). *An investigation of chirped fibre Bragg gratings Fabry-Perot for sensing applications*. Thèse de doctorat, Cranfield University.
- [Childs, 2000] CHILDS, P. (2000). *Multiplexed optical fibre sensor systems for civil engineering applications*. Thèse de doctorat, University of New South Wales.
- [CLEVACTI, 2009] CLEVACTI, S. (2009). Encyclopédie scientifique en ligne. www.techno-science.net.
- [Cohen, 2005] COHEN, S. (2005). *Systèmes et méthodes de détection automatique des incidents routiers*. Les collections de l'INRETS, lavoisier édition. ISBN : 2-85782-615-X, ISSN : 0769-0274, 2005.
- [Coiret et Lechner, 2006] COIRET, A. et LECHNER, D. (2006). Torseur d'effort pneumatique/chaussée en virage : acquisition embarquée et par un capteur chaussée (véhicule 307 - inrets/ma & système mevi). Rapport technique, Rapport du projet SARI - thème RADARR, livrable 3.1.4.
- [Coue, 2003] COUE, C. (2003). *Modèle bayésien pour l'analyse multimodale d'environnements dynamiques et encombrés : Application à l'assistance à la conduite en milieu urbain*. Thèse de doctorat, INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble).
- [Cruz et al., 1997] CRUZ, J.-L., DIEZ, A., ANDRÉS, M. et al. (1997). Fibre bragg gratings tuned and chirped using magnetic fields. *Electronics letters*, 33(3).
- [DARPA, 2008] DARPA (2008). <http://www.darpa.mil/grandchallenge/index.asp>, valide au 13 mai 2008.
- [Daucher et Jacob, 2008] DAUCHER, D. et JACOB, B. (2008). Investigation of road vehicle trajectory for road safety. *Transport Research Arena (TRA) 2008*.
- [David et al., 1999] DAVID, Y., BREHERET, L., HENRY, J.-J. et CARE-COLIN, S. . (1999). *Data plus*. CERTU. ISSN : 1263-2570.
- [Davino et al., 2006] DAVINO, D., VISONI, C., AMBROSINO, C. et al. (2006). Magnetic field sensors employing fiber bragg grating and magneto-elastic active material. *In Magnetics conference INTERMAG 2006*.
- [Dewynter-Marty et al., 2001] DEWYNTER-MARTY, V., ROUGEAULT, S., FERDINAND, P. et al. (2001). Evaluation des performances d'extensomètres à fibre optique à réseaux de bragg pour le génie civil. *In d'Optique TRÉGASTEL, S. F., éditeur : Colloque CMOI, Méthode Optiques pour l'Industrie*, volume 1, pages 92–98.
- [DGE, 2006] DGE (2006). Etude technologies clés 2010. Ministère de l'Économie, des Finances et de l'Industrie. Direction Générale des Entreprises (DGE).
- [DIACT et le Ministère de l'Economie des Finances et de l'Emploi, 2007] DIACT et le Ministère de l'Economie des Finances et de L'EMPLOI (2007). <http://competitivite.gouv.fr>, filière transport, valide au 13 mai 2008.
- [Ding, 2003] DING, J. (2003). Vehicle detection by sensor network nodes. Mémoire de D.E.A., Berkeley.
- [Doré, 2007] DORÉ, G. (2007). Conception et analyse des chaussées - module 1 : Calcul des contraintes et des déformations dans la chaussée. Université Laval. Cours n°GCI-65180.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [Duhamel *et al.*, 2002] DUHAMEL, D., ALAOU, A., BERNARD, C. *et al.* (2002). Cours métrologie. Rapport technique, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [Dupont, 2002] DUPONT, J. (2002). *Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [Duquennois *et al.*, 2005] DUQUENNE, F., BOTTON, S., PEYRET, F. *et al.* (2005). *GPS - localisation et navigation par satellites*. hermes science. ISBN : 2-7462-1090-8.
- [Erdogan, 1997] ERDOGAN, T. (1997). Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8).
- [ERTICO, 2009] ERTICO (2009). <http://www.ertico.com>, valide au 18 septembre 2009.
- [Ferdinand, 1999] FERDINAND, P. (1999). Capteurs à fibres optiques à réseaux de bragg. Rapport technique, Techniques de l'ingénieur. E 6 735.
- [Fillastre, 2006] FILLASTRE, D. (2006). Guide de pose des capteurs piezo-électriques type fibre de verre. Rapport technique, Setra - CETE Normandie Centre.
- [France, 2004] FRANCE, E. G. (2004). L'identification par radio fréquence, principe et applications. Rapport technique, Gencod EAN. EPC2004-032, version 4.01.
- [Frazao *et al.*, 2003] FRAZAO, O., LIMA, M.-J.-N. et SANTOS, J.-L. (2003). Simultaneous measurement of strain and temperature using type i and type iia fibre bragg gratings. *J. Optic A : Pure Appl. Opt*, 5(3):183–185.
- [Frickey, 1994] FRICKEY, A. (1994). Conversions between s, z, y, h, abcd and t parameters which are valid for complex source and load impedances. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 42(2). 0018-9480/94.
- [Gardiol, 1977] GARDIOL, F. (1977). *Traité d'électricité de l'école polytechnique fédérale de lausanne - Electromagnétisme*, volume 3. Georgi. ISBN 2-604-00005-9.
- [Gatet et Tap-Béteille, 2009] GATET, L. et TAP-BÉTEILLE, H. (2009). Measurement range increase of a phase-shift laser rangefinder using a cmos analog neural network. *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 58(6).
- [Georges, 2001] GEORGES, S. (2001). *Evaluation de l'effet de la mer et du contrepoids sur le profil de la tension d'un système de mise à la terre d'une ligne de transport d'énergie à haute tension dans un sol résistif*. Thèse de doctorat, Ecole de technologie supérieure - Université du Québec.
- [Giaccari, 2003] GIACCARI, P. (2003). *Fiber Bragg grating characterization by optical low coherence reflectometry and sensing applications*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique federale de Lausanne.
- [Gibson et Tweedy, 1998] GIBSON, D. et TWEEDY, C. (1998). An advanced preformed inductive loop sensor. *In North American Travel Monitoring Exhibition and Conference (NAT-MEC)*.

-
- [Glaser, 2004] GLASER, S. (2004). *Modélisation et analyse d'un véhicule en trajectoires limites ; Application au développement de systèmes d'aide à la conduite*. Thèse de doctorat, Université d'Evry.
- [Goyat et al., 2006] GOYAT, Y., CHATEAU, T., MALATERRE, L. et TRASSOUDAIN, L. (2006). Vehicle trajectories evaluation by static video sensors. In *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*.
- [Grassin d'Alphonse, 1997] GRASSIN D'ALPHONSE, E. (1997). Connectique optique. *Techniques de l'ingénieur*, (E 3 937).
- [Gréacias et Migeon, 1999] GRÉCIAS, P. et MIGEON, J.-P. (1999). *Physique-Sup. PCSI, cours et exercices d'application*. Tec & Doc. ISBN : 2 7430 0302 2.
- [Hachette, 2008] HACHETTE (2008). Histoire des routes. Hachette Multimédia.
- [Hallenbeck et Weinblatt, 2004] HALLENBECK, M. et WEINBLATT, H. (2004). National cooperative highway research program (nchrp), report 509, equipment for collecting traffic load data. *Transportation Research Board*. n°2004100961, ISSN : 0077-5614, ISBN : 0-309-08788-0.
- [Hao et al., 2006] HAO, J.-Z., TAKAHASHI, S., CAI, Z.-H. et al. (2006). Packaging effects on fiber bragg grating sensor performance. *Automatica Sinica*, 32(6):999–1007.
- [Heinhold, 1993] HEINHOLD, L. (1993). *Power cables and their application*. Wiley-VCH. ISBN 978 3800915750.
- [Hexamite, 2006] HEXAMITE (2006). <http://www.hexamite.com> et <http://www.hexamite.com/hetheory.htm>.
- [Hill, 2000] HILL, K. (2000). Photosensitivity in optical fiber waveguides : from discovery to commercialization. *IEEE Journal of Quantum electronics*, 6(6):1186–1189. ISSN : 1077-260X.
- [Hill et al., 1978] HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D.-C. et B.-S., K. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides : application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32:647–649.
- [Hill et Meltz, 1997] HILL, K.-O. et MELTZ, G. (1997). Fiber bragg grating technology fundamentals and overview. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8):1263–1276.
- [Huang et Yang, 1999] HUANG, D.-W. et YANG, C.-C. (1999). Reconstruction of fiber grating refractive-index profiles from complex bragg reflection spectra. *Applied optics*, 38(21): 1263–1276.
- [Iaquinta et al., 2004] IAQUINTA, J., MERLIOT, E., COTTINEAU, L.-M. et DESROCHE, J.-P. (2004). Piezoelectric sensors for weigh-in-motion systems : An experimental insight into edge effects. *Journal of Testing and Evaluation*, 32(No. 6 Paper ID JTE12207).
- [IDIL, 2007] IDIL, f. o. (2007). Analyseur de spectre optique, modèle : Aso. Rapport technique.
- [Ieng et al., 2005] IENG, S.-S., GRELLIER, C. et BERTRAND, J. (2005). Détection et suivi des véhicules par boucles électromagnétiques. In *Statistique des processus, applications au traitement du Signal et de l'Image à Angers (SSIA)*.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [Ieng *et al.*, 2004] IENG, S.-S., TAREL, J.-P. et CHARBONNIER, P. (2004). Estimation robuste pour la détection et le suivi par caméra. *I-Revues INIST-CNRS, Traitement du Signal*, 21(3): 205–226.
- [Joindot et Joindot, 1999] JOINDOT, M. et JOINDOT, I. (1999). Fibres optiques pour télécommunications. *Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique*, (E 7 110).
- [Khalil et Dombre, 1999] KHALIL, W. et DOMBRE, E. (1999). *Modélisation, identification et commande des robots*. Hermès - Lavoisier. ISBN 978-2-746260003-1.
- [Kim *et al.*, 2006] KIM, C.-S., LEE, T., Y, Y. *et al.* (2006). Multi-point interrogation of fbg sensors using cascaded flexible wavelength-division sagnac loop filters. *Opt. Express*, 14(19):8546–8551.
- [Klein, 2001] KLEIN, L. (2001). *Sensor Technologies and Data Requirements for ITS*. Artech House. ISBN 1-58053-077-X.
- [Klein et Kelley, 1996] KLEIN, L. A. et KELLEY, M. (1996). Detection technology for ivhs. Rapport technique, Federal Highway Administration report. FHWA-RD-95-100.
- [Kowlessur, 2001] KOWLESSUR, S. (2001). Transducteur piézo-céramique large bande. Mémoire de D.E.A., Ecole d'ingénieur de Genève - Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale.
- [Kunzler *et al.*, 2003] KUNZLER, M., UDD, E., TAYLOR, T. et KUNZLER, W. (2003). Traffic monitoring using fiber optic grating sensors on the i-84 freeway & future uses in wim. *In Proc. of SPIE*, volume 5278, Switzerland.
- [Lechner, 2002] LECHNER, D. (2002). *Analyse du comportement dynamique des véhicules routiers légers : Développement d'une méthodologie appliquée à la sécurité primaire*. Thèse de doctorat, INRETS.
- [Lee *et al.*, 2001] LEE, Y.-K., SONG, I.-C., JEONG, S.-H. *et al.* (2001). Absolute strain measurement for fiber bragg grating sensor using a string resonator with high accuracy. *In American Society for Precision Engineering (ASPE)*, Virginia.
- [Legrand, 2001] LEGRAND (2001). La fibre optique. *Cahier Technique*, (12).
- [Lemaire *et al.*, 1993] LEMAIRE, P.-J., ATKINS, R.-M., MIZRAHI, V. et REED, W. (1993). High pressure h2 loading as a technique for achieving ultrahigh uv photosensitivity and thermal sensitivity in geo2 doped optical fibres. *Electronics Letters*, 29(13):1191–1193.
- [Lemonde et Devy, 2005] LEMONDE, V. et DEVY, M. (2005). Détection d'obstacles par stereovision sur véhicules intelligents. *Proceedings of ORASIS (Congrès des jeunes chercheurs en vision par ordinateurs)*.
- [Lequime, 1997] LEQUIME, M. (1997). Réseaux de capteurs à fibres optiques. *Techniques de l'ingénieur*, (R 460).
- [Li *et al.*, 2007] LI, G., GUO, T., ZHANG, H. *et al.* (2007). Fiber grating sensing interrogation based on the ingaas photodiode linear array. *Applied Optics*, 46(3):283–286.
- [Line, 2009] LINE, S. (2009). site internet : <http://www.sensorline.de/>.

-
- [LIVIC, 2006] LIVIC (2006). Site internet du LIVIC (Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs), UMR INRETS-LCPC, <http://www.inrets.fr/ur/livic/index.html>.
- [Lourdiane, 2005] LOURDIANE, M. (2005). *CDMA à séquence directe appliqué aux communications optiques*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications.
- [Luo, 2002] LUO, H. (2002). *Integrated multiple device CMOS-MEMS IMU Systems and RF MEMS Applications*. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University.
- [Madhan *et al.*, 2005] MADHAN, T., USHA, R., NITESH, G. *et al.* (2005). Strain and temperature discrimination using single fbg in mach zehnder interferometer. *In International Conference on Smart Materials Structures and Systems*, Bangalore (India).
- [Martin *et al.*, 2003] MARTIN, P., FENG, Y. et WANG, X. (2003). Detector technology evaluation. Rapport technique UT-03.30, Utah. Department of Transportation Research and Development Division.
- [Mauris, 1992] MAURIS, G. (1992). *Capteurs ultrasonores « intelligents », application à la représentation symbolique de mesures de distance par codage flou*. Thèse de doctorat, Université de Savoie.
- [Meltz *et al.*, 1989] MELTZ, G., MOREY, W. W. et GLENN, W. H. (1989). Formation of bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Opt. Lett.*, (14):823–825.
- [Molimard, 2005] MOLIMARD, J. (2005). Application de méthodes optiques à la mécanique expérimentale. Rapport technique. Rapport de HDR.
- [Moreau, 1970] MOREAU, A. (1970). *Cours par correspondance sur les lignes à retard électromagnétiques*. Groupe Thomson-csf.
- [Morey *et al.*, 1989] MOREY, W. W., MELTZ, G. et GLENN, W. H. (1989). Bragg grating temperature & strain sensors. *Optical Fiber Sensors*, 44:526–531.
- [Mourllion *et al.*, 2006] MOURLLION, B., GRUYER, D. et LAMBERT, A. (2006). Variance behavior and signification in probabilistic framework applied to vehicle localization. *In IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, volume 10.1109, pages 294–299, Japon. ISBN : 4-901122-86-X.
- [Nordin, 2004] NORDIN, D. (2004). *Optical Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) Range and Velocity Measurements*. Thèse de doctorat, Lulea University of Technology.
- [Noury, 2002] NOURY, N. (2002). *Du signal à l'information : le capteur intelligent. Exemples industriels et en médecine*. Hdr, Université Joseph Fourier de Grenoble 1.
- [NPDC, 2007] NPDC, D. (2007). Immatriculation 2006 et parc de véhicules au 1er janvier 2007. www.nord.equipement.gouv.fr. Direction Régionale de l'Équipement Nord-Pas-de-Calais - Cellule Applications Statistiques.
- [Obaton *et al.*, 2003] OBATON, A.-F., PALAVICINI, C., JAOUËN, Y. *et al.* (2003). Caractérisation de réseau de bragg par réflectométrie optique à faible cohérence. *In 11e congrès international de métrologie*.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [Oh *et al.*, 2002] OH, S., RITCHIE, S. G. et OH, C. (2002). Real time traffic measurement from single loop inductive signatures. *Transportation Research Record*, 1804:98–106. ISSN : 0361-1981.
- [Olivero *et al.*, 2008] OLIVERO, P., JACOB, B. et DAUCHER, D. (2008). Glossaire : Métrologie des trajectoires et du trafic. Rapport technique, LCPC. version 5.5.
- [ONISR, 2008] ONISR (2008). Les grandes données de l'accidentologie. Rapport technique, ONISR. Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière (ONISR).
- [ONISR, 2009] ONISR (2009). <http://www.securiteroutiere.gouv.fr/>, sous section du site du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.
- [Palavicini Cham, 2004] PALAVICINI CHAM, C. (2004). *Analyse de composants photoniques par réflectométrie à faible cohérence sensible à la phase*. Thèse de doctorat, ENST.
- [PARET, 1999] PARET, D. (1999). *Le bus CAN, Applications*. Dunod. ISBN 2 10 003659 9.
- [Plainchault, 2005] PLAINCHAULT, P. (2005). *Sécurisation de la conduite par communication véhicule infrastructure à base de transpondeurs*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [Plainchault, 2006] PLAINCHAULT, P. (2006). Traitement des données. cours du master 2 recherche COI (module traitement des données).
- [Plainchault et Aubin, 2009] PLAINCHAULT, P. et AUBIN, S. (2009). Dispositif de détection de la position d'un objet dans une zone et système de détermination de la position d'un objet dans une zone qui utilise un ou plusieurs de tels dispositifs de détection. Brevet, France. FR2922352 (A1) - 2009-04-17.
- [projet LAVIA, 2006] projet LAVIA (2006). <http://heberge.lcpc.fr/lavia/index.html>.
- [Queyrel et Mesplède, 1996] QUEYREL, J.-L. et MESPLÈDE, J. (1996). *Précis de physique, optique, prépas MP-PC-PSI-PT*. Numéro 11. Bréal. ISBN : 2 85394 941 9.
- [Rostami *et al.*, 2007] ROSTAMI, A. *et al.* (2007). A new method for classification and identification of complex fiber bragg grating using the genetic algorithm. *Progress In Electromagnetics Research (PIER)*, 75.
- [Safaai-Jazi *et al.*, 1990] SAFAAI-JAZI, A., ARDEKANI, S. A. et MEHDIKHANI, M. (1990). A low-cost fiber optic wight-in-motion sensor. Rapport technique, Strategic Highway Research Program.
- [Sekula *et al.*, 2004] SEKULA, K., KNAP, L. et HOLNICKI-SZULC, J. (2004). New sensors system for monitoring of traffic load. *In 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring*.
- [Sensors, 2006] SENSORS, F. (2006). Faq du site internet de FGP Sensors, www.fgp-instrumentation.com.
- [SESP, 2008] SESP (2008). Transport et publication. www.statistiques.equipement.gouv.fr. Service Economie Statistiques et Prospective (SESP).
-

-
- [SETRA/CSTR, 1995] SETRA/CSTR (1995). *Les capteurs de trafic routier, guide technique*. Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA). ISBN 2 11 085776-5.
- [Sheffi, 2004] SHEFFI, Y. (2004). Rfid and the innovation cycle. *International Journal of Logistics management*, 1(15).
- [Simond, 2005] SIMOND, N. (2005). *Localisation robuste d'un véhicule en environnement urbain à l'aide d'un système de stéréo-vision*. Thèse de doctorat, université de Nice - Sophia Antipolis.
- [Skaar, 2008] SKAAR, J. (2008). Modelling fiber bragg gratings. Cours de Institutt for elektronikk og telekommunikasjon.
- [Stanczyk et Millot, 2005] STANCZYK, D. et MILLOT, A. (2005). Frao. Rapport technique, CETE de l'Est.
- [Stojanovic et al., 2006] STOJANOVIC, M. S., TASIC, D. et RANCIC, P. (2006). An improvement of equivalent electrodes method for calculation of three-core cable capacitances. *6th international symposium Nikola Tesla*.
- [Suleiman et al., 2008] SULEIMAN, M., SEAT, H. C. et BOSCH, T. (2008). Interrogation of fiber bragg grating dynamic strain sensors by self-mixing interferometry. *IEEE Sensors journal*, 8(7).
- [Sun et Ritchie, 1999] SUN, C. et RITCHIE, S. (1999). Individual vehicle speed estimation using single loop inductive waveforms. *California PATH working paper*. UCB-ITS-PWP-99-14, ISSN : 1055-1417.
- [Tan et al., 2000] TAN, C.-W., MOSTOV, K. et VARAIYA, P. (2000). Feasibility of a gyroscope-free inertial navigation system for tracking rigid body motion. Rapport technique, University of California - Berkeley. UCB-ITS-PRR-2000-9, ISSN 1055-1425.
- [Thourel, 1982] THOUREL, L. (1982). *Initiation aux techniques modernes des radars*. Cepadues éditions. ISBN 2 85428 078 4.
- [Trassoudaine, 2004] TRASSOUDAINE, L. (2004). Détection d'obstacles par fusion multisensorielle. Rapport technique, rapport du projet ARCOS thème 1 R9.
- [Turpin, 2001] TURPIN, M. (2001). *Capteurs à réseaux de Bragg fibrées - Utilisation des réseaux de Bragg comme capteurs à fibre optique intrinsèques*. ARATEM.
- [Udd et al., 2000] UDD, E., SCHULZ, W., L., SEIM, J., M. et al. (2000). Single and multi-axis fiber grating strain sensor systems for bridge monitoring. *In International Conference on Trends in Optical Nondestructive Testing*, Switzerland.
- [USIRF, 2008] USIRF (2008). Réseau et trafic. www.usirf.com. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF).
- [Verneuil, 2003] VERNEUIL, J.-L. (2003). *Simulation de systèmes de télécommunications par fibre optique à 40 Gbits/s*. Thèse de doctorat, Université de Limoges.
- [VERTIS, 2009] VERTIS (2009). <http://www.its-jp.org>, valide au 18 septembre 2009.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [Violette, 2003] VIOLETTE, E. (2003). *Evaluation d'un capteur infrarouge de trafic*. CERTU. CERTU-RE - 03-07.
- [Wang, 2005] WANG, Y. (2005). Bragg gratings in spun fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 17(6):1220–1222.
- [Wang et Nihan, 2000] WANG, Y. et NIHAN, N. L. (2000). Freeway traffic speed estimation with single-loop outputs. *Transportation Research Record*, 1727(0361-1981):120–126. ISSN : 0361-1981.
- [Xiao, 2000] XIAO, H. (2000). *Self-Calibrated Interferometric/Intensity Based Fiber Optic Pressure Sensors*. Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [Xue et al., 2006] XUE, L., LIU, J., LIU, Y. et al. (2006). Method for enhancing temperature sensitivity of fiber bragg gratings based on bimetallic sheets. *Applied Optics*, 45(31):8132–8135.
- [Yannis et Antoniou, 2005] YANNIS, G. et ANTONIOU, C. (2005). Integration of weigh-in-motion technologies in road infrastructure management. *Institute of Transportation Engineers (ITE) Journal*, 75(1):39–43. ISSN : 0162-8178.
- [Yim et Cayford, 2001] YIM, Y. Y. et CAYFORD, R. (2001). Investigation of vehicles as probes using global positioning system and cellular phone tracking : Field operational test. Rapport technique, California PATH Working Paper. UCB-ITS-PWP-2001-9, ISSN 1055-1417.
- [Zazou, 2009] ZAZOU, A. (2009). Encyclopédie Larousse. www.larousse.fr. Article sur le gyroscope.

Acronymes

ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems</i>	3
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie	10
CAN	<i>Controller Area Network</i>	87, 88, 109, 157
CAN	Convertisseur Analogique Numérique	87, 88, 111, 115, 157
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	45
CER	Centre d'Etude et de Recherche	55
CFO	Capteur à Fibres Optiques	66, 82, 126, 127, 129–132, 134, 136, 142, 145, 146, 165, 166, 191
CNSR	Conseil National de la Sécurité Routière	14
DEL	Diode Electroluminescente	176
DGPS	<i>Differential GPS</i>	44
FMCW	<i>Frequency Multiplexing Continuous Wave</i>	68
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System ou Système de Navigation Global par Satellite</i>	43, 50
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>	45
GPS	<i>Global Positioning System</i>	43, 44
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>	45
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité	10
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques	10
ITS	<i>Intelligent Transport Systems</i>	1–4
LAVIA	Limiteur s'Adaptant à la Vitesse Autorisée	23
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées	22, 172

Acronymes

LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées	123, 134, 145
OFDR	<i>Optical Frequency Domain Reflectometry</i>	68
OTDR	<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>	68
PMDI	<i>Path Matched Differential Interferometry</i>	68
POTDR	<i>Polarization Optical Time Domain Reflectometry</i>	68
PREDIT	Programme de Recherche et Développement pour l'Innovation et la Technologie dans les Transports Terrestres	5
RADARR	Recherche des Attributs pour le Diagnostic Avancé des Ruptures de la Route	22
RFID	<i>Radio Frequency IDentification</i>	42
SARI	Surveillance Automatisée des Routes pour l'Information des conducteurs et des gestionnaires	5, 6, 22, 26, 119
SESP	Service Economie, Statistiques et Prospective	10
SHF	Supra-Haute Fréquence ou <i>Super High Frequency</i>	42
SOFRES	SOciété FRançaise d'Enquêtes par Sondages	10
STI	Systèmes de Transport Intelligents	1
TDM	<i>Time domain Multiplexing</i>	68
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication	1
UHF	Ultra Haute Fréquence ou <i>Ultra High Frequency</i>	42
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>	45
VIZIR	Vision Intelligente de Zones et Itinéraires à Risques	5
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>	60, 68
WIM	<i>Weigh In Motion</i>	25, 28

TITLE

New position sensors: Application to Intelligent Transport Systems within the context of estimation of vehicle trajectories

ABSTRACT

This action stake is not technology for itself. It is a great help the development of new safety functions, e.g. the estimation of driver's behaviour based upon the vehicle's trajectory. This trajectory is determined via two sensors we developed. This system must not disturb the driver and should therefore remain invisible to him.

The first one is a fiber Bragg grating sensor. It detects local strain due to the vehicle weight. The second one is based upon two conductors. One of them has a grater electrical resistance. The vehicle's weight creates a link between the two conductors. The resulting electrical resistance provides a lateral position estimation of the vehicle. Both of them were tested on a secondary road.

KEYWORDS

Bragg grating, resistance sensor, fiber optic sensor, estimation of vehicle trajectories, position sensor, traffic sensor, lateral position estimation, Intelligent Transport Systems (ITS).

AUTEUR : Sébastien AUBIN

TITRE : Capteurs de position innovants : application aux Systèmes de Transport Intelligents dans le cadre d'un observatoire de trajectoires de véhicules

DIRECTEUR DE THESE : Thierry BOSCH

ENCADRANT : Patrick PLAINCHAULT

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Angers (49), le 12 décembre 2009

RESUME :

Améliorer la sécurité routière passe par une meilleure compréhension des causes d'accidents. Il est nécessaire de développer des observatoires discrets pour étudier la manière de conduire de tous les automobilistes. Une partie de cette analyse implique l'utilisation de capteurs mesurant les trajectoires des véhicules sur une portion de route.

Deux capteurs innovants ont été créés pour pallier au manque de capteurs suffisamment précis : le premier est un capteur à fibres optiques présentant une succession de réseaux de Bragg et le second, protégé par un brevet, est fondé sur une technologie résistive. Ils ont été soumis à une expérimentation sur une route départementale. Le capteur optique s'avère performant mais coûteux. Le deuxième n'est pas assez robuste mais présente des perspectives intéressantes.

MOTS-CLES : Réseau de Bragg, capteur résistif, capteur à fibres optiques, observatoire de trajectoires, capteur de position, capteur routier, position latérale, Systèmes de Transport Intelligents (STI).

DISCIPLINE : Micro-onde, Electromagnétisme et Optoélectronique

LABORATOIRE DE RATTACHEMENT :

LOSE - ENSEEIHT
2 rue Camichel
BP 7122
31071 Toulouse Cedex 7