



HAL
open science

Modélisation, dimensionnement et optimisation d'un capteur hybride pour la détection des deux roues motorisées dans le trafic routier

Hamza Kerbouai

► **To cite this version:**

Hamza Kerbouai. Modélisation, dimensionnement et optimisation d'un capteur hybride pour la détection des deux roues motorisées dans le trafic routier. Autre. Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, 2015. Français. NNT : 2015BELF0260 . tel-01499648

HAL Id: tel-01499648

<https://theses.hal.science/tel-01499648>

Submitted on 31 Mar 2017

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.

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques

UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

Modélisation, optimisation et conception d'un capteur hybride pour la détection des deux-roues-motorisés dans le trafic

■ KERBOUAI HAMZA

SPIM

Thèse de Doctorat



école doctorale sciences pour l'ingénieur et microtechniques
UNIVERSITÉ DE TECHNOLOGIE BELFORT-MONTBÉLIARD

THESE présentée par

Hamza KERBOUAI

Pour obtenir le
Grade de Docteur de
L'université de Technologie de Belfort-Montbéliard
Spécialité : **Génie électrique**

Modélisation, optimisation et conception d'un capteur hybride pour la détection des deux-roues-motorisés dans le trafic

Soutenu le 02 septembre 2015 devant le jury

M. Abdellah EL-MOUDNI	Directeur de thèse	Professeur des universités à l'UTBM
M. Mohamed BENBOUZID	Rapporteur	Professeur des universités à l'Université de Brest
M. Radu-Adrian TIRNOVAN	Rapporteur	Professeur des universités à l'Université technique de Cluj-Napoca
Mme. Yamin LEPRINCE-WANG	Examineur	Professeur des universités à l'Université de Paris-Est Marne-la-Vallée
M. Abdoul N'DIAYE	Examineur	Dr. Ingénieur à l'UTBM
M. David BOUQUAIN	Examineur	MCF à l'UTBM
M. Salim SRAIRI	Examineur	Docteur chercheur, CEREMA Ile-de-France
Mme. Christèle LECOMTE	Examineur	MCF à l'Université de Rouen

Avant Propos

Ce travail de thèse a été mené dans le cadre du projet METRAMOTO (Mesure du trafic des deux roues motorisés pour la sécurité routière et l'évaluation des risques). Il a été réalisé au sein du Laboratoire IRTES-SeT (Institut de Recherche sur les Transports, l'Énergie et la Société- Systèmes et Transports), de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM).

Ce travail n'aurait jamais abouti sans l'aide et le soutien de mon directeur de thèse, mes encadrants de thèse, mes collègues, mes amis et ma famille.

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, M. Abdellah EL-MOUDNI, Professeur des Universités à l'UTBM, qui a accepté de diriger cette recherche.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à M. Abdoul N'DIAYE, Dr-ingénieur à l'UTBM et M. David BOUQUAIN maître de conférence à l'UTBM pour avoir encadré mes travaux de recherche, pour leurs qualités humaines et pédagogiques ainsi que leurs conseils précieux. J'ai beaucoup appris à leurs côtés.

Mes remerciements vont également à M. Salim SRAIRI qui a participé à l'encadrement de cette thèse et aussi pour sa gentillesse et ces conseils.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mme. Yamin LEPRINCE-WANG, Professeur à l'Université de Paris-Est Marne-la-Vallée (UPEM), pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury.

Je remercie très sincèrement M. Mohamed BENBOUZID, Professeur des Universités à l'Université de Brest, et Radu-Adrian TIRNOVAN, Professeur des Universités à l'Université technique de Cluj-Napoca, pour avoir rapporté ce travail de thèse.

J'adresse également mes profonds remerciements à Mme Christèle LECOMTE, Maître de Conférences à l'université de Rouen, pour avoir accepté de participer à mon jury.

Je remercie vivement tous les membres du Laboratoire IRTES-SeT, pour leur accueil, leur soutien scientifique, technique, administratif et amical.

Je souhaite aussi adresser mes sincères remerciements aux membres de l'équipe du projet METRAMOTO, avec qui les échanges ont toujours été fraternels.

J'adresse mes remerciements les plus profonds à tous les amis et collègues de l'UTBM, doctorant, étudiants et personnels, pour leurs amitiés et leurs soutiens.

Enfin, j'adresse tous mes remerciements à mes parents qui me sont chères pour leur soutien permanent s'étendant bien au-delà de la thèse. Il m'est impossible d'exprimer, avec des mots, toute ma gratitude et mon respect envers mes parents, pour les valeurs qu'ils m'ont inculquées, leurs encouragements et soutiens perpétuels. J'espère que ce mémoire contribuera modestement à les remercier.

Je dédie ce mémoire à ma femme, mes frères et sœurs, mon fils ANIS et à tous mes amis.

SOMMAIRE

I. Nomenclature.....	2
II. Liste des Figures	8
III. Liste des Tableaux	11
IV. INTRODUCTION GÉNÉRALE	13
IV.1 PROBLÉMATIQUE	14
IV.2 ORGANISATION DU DOCUMENT	17
V. CHAPITRE 1.....	19
Généralités sur les routes et les véhicules, état de l'art sur les techniques de détection et de suivi du trafic, état de l'art sur les boucles électromagnétiques.	19
V.1 INTRODUCTION	20
V.2 INFRASTRUCTURE ROUTIÈRE EN FRANCE.....	20
V.2.1 La doctrine routière	20
V.2.2 Différents types de routes.....	20
V.2.3 Gestionnaires des routes	22
V.2.4 Aménagement d'une route considérée comme référence	22
a) Les chaussées	23
b) Le terre-plein central (T.P.C.).....	23
c) Les zones de sécurité (accotement)	24
V.2.5 Caractéristiques des différentes routes.....	24
V.2.5.1 Caractéristiques des Autoroutes.....	24
V.2.5.2 Caractéristiques des routes express (ou voies rapides) (VRU)	24
V.2.5.3 Caractéristiques des artères interurbaines (R).....	25
V.2.5.4 Caractéristiques des routes communales.....	25
V.2.6 Synthèse du travail sur les routes.....	25
V.3 VÉHICULES.....	26
V.3.1 Les différentes classes de véhicules	26
V.3.1.1 Classe 1 : véhicules légers, véhicules ou ensembles roulants.....	27
V.3.1.2 Classe 2 : véhicules intermédiaires, véhicules ou ensembles roulants	27
V.3.1.3 Classe 3 : poids lourds et autocars à 2 essieux, véhicules à 2 essieux.....	27
V.3.1.4 Classe 4 : poids lourds et autocars à plus de 2 essieux, véhicules ou ensembles roulants à 3 essieux et plus	27
V.3.1.5 Classe 5 : 2RM, 3RM (side-cars, trikes)	27
V.3.2 Caractéristiques des différentes catégories de véhicules	27
V.3.2.1 Caractéristiques des véhicules légers	27
V.3.2.1.1 Dimensions et poids des véhicules légers	27
V.3.2.1.2 Différents types de châssis pour les véhicules légers	28
a) Le châssis élémentaire	28
b) Le châssis tubulaire	29
c) Le châssis plate-forme.....	29
d) Le châssis poutre	30
e) Le châssis coque	30
f) Le châssis caisson	31
V.3.2.2 Caractéristiques des véhicules utilitaires.....	31
V.3.2.2.1 Dimensions des véhicules utilitaires.....	31
V.3.2.2.2 La forme du châssis	32
V.3.2.3 Caractéristiques des véhicules de types autobus et autocar.....	32
V.3.2.4 Caractéristiques des PL.....	32
V.3.2.4.1 Dimensions des PL.....	33
V.3.2.4.2 La forme de la carrosserie.....	33
V.3.2.5 Caractéristiques des 2RM.....	34
V.3.3 Synthèse des travaux de recherche sur les véhicules.....	35
V.4 LES TECHNIQUES DE DÉTECTION ET DE SUIVI DU TRAFIC	35
V.4.1 Les tubes pneumatiques	36
V.4.2 Les capteurs résistifs	36
V.4.3 Les radars Doppler	36

SOMMAIRE

V.4.4	Les technologies Infrarouge	37
V.4.5	Les barrières photoélectriques.....	37
V.4.6	Le capteur Ultrason.....	37
V.4.7	Les fibres optiques	37
V.4.8	Télémètre laser à balayage (Cete NC).....	37
V.4.9	Capteurs vidéo (Néavia, Ifsttar, Litis).....	38
V.4.10	Magnétomètres (Cete Ouest, CEA).....	39
V.4.11	Les boucles électromagnétiques	40
V.4.12	Les câbles piézoélectriques	40
V.4.13	Synthèse des travaux sur les techniques de détection	40
V.5	PRINCIPAUX TYPES DE BOUCLES ÉLECTROMAGNÉTIQUES.....	40
V.5.1	Boucles électromagnétiques existantes	41
V.5.2	Caractéristiques de quelques boucles électromagnétiques	44
a)	Boucle en forme de chevron	44
b)	Boucle magnétique en forme de palmier.....	44
c)	Boucle avec tête	45
d)	Boucle en forme de quadripôle	46
V.5.3	Synthèse des travaux sur les boucles	47
VI.	CHAPITRE 2.....	48
	Approches de la modélisation analytique et numérique tridimensionnelle du système composé de boucles électromagnétiques et de véhicules. Dimensionnement d'un capteur magnétique	48
VI.1	INTRODUCTION.....	49
VI.2	PRÉSENTATION DU SYSTÈME ÉTUDIÉ.....	49
VI.2.1	Les boucles électromagnétiques	49
VI.2.2	Le véhicule.....	49
VI.3	MODÉLISATION ANALYTIQUE ET NUMÉRIQUE DU SYSTÈME COMPOSÉ DE BOUCLES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET DE VÉHICULES ⁵¹	
VI.3.1	Nature du problème étudié	51
VI.3.2	Approche de la modélisation numérique sous FLUX3D	53
VI.3.3	Approche de la modélisation analytique	54
VI.3.3.1	Modèles développés pour le système 1 : cas des boucles de forme rectangulaire.....	54
VI.3.3.1.1	Modèle de calcul de l'inductance propre d'une boucle rectangulaire	54
VI.3.3.1.2	Modèle permettant d'avoir la distribution du champ magnétique, créée par une boucle rectangulaire, autour d'une voie de circulation	57
VI.3.3.1.3	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire située à côté d'une autre boucle ..	59
VI.3.3.1.4	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire	62
VI.3.3.1.4.1	Systèmes équivalents au système réel « boucles électromagnétiques-châssis ».....	62
VI.3.3.1.4.2	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire traversée par un véhicule	64
VI.3.3.1.4.3	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire traversée par deux véhicules ..	67
VI.3.3.1.4.4	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire en fonction de la position latérale du véhicule sur la voie.....	68
VI.3.3.1.5	Modèle pour tracer la signature d'un véhicule traversant une boucle rectangulaire	69
VI.3.3.2	Modèles développés pour le système 2 : Cas des boucles de forme circulaire.....	71
VI.3.3.2.1	Modèle de calcul de l'inductance propre d'une boucle circulaire	71
VI.3.3.2.2	Modèle permettant d'avoir la distribution du champ magnétique, créé par une boucle circulaire, autour d'une voie de circulation	73
VI.3.3.2.3	Model de calcul de la sensibilité d'une boucle circulaire	74
VI.3.3.2.3.1	Système équivalent au système réel « boucles électromagnétiques – châssis »	74
VI.3.3.2.3.2	Modèle de calcul de la sensibilité maximale d'une boucle circulaire.....	75
VI.3.3.2.3.3	Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle circulaire traversée par un véhicule. Modèle de calcul de la sensibilité parasite entre boucle adjacentes.....	77
VI.3.3.2.4	Modèle pour tracer la signature d'un véhicule traversant une boucle circulaire	78
VI.4	CALIBRAGE DES MODÈLES ÉTABLIS POUR LE SYSTÈME ÉQUIVALENT 1	79
VI.4.1	Calibrage du modèle de la sensibilité par rapport au changement de la perméabilité.....	80
VI.5	VALIDATION EXPÉRIMENTALE DU MODÈLE DE LA SENSIBILITÉ	80
VI.6	ÉVALUATION DU MODÈLE DE LA SENSIBILITÉ	82

SOMMAIRE

VI.7	SYNTHÈSE.....	84
VII.	CHAPITRE 3.....	85
	Approches de la modélisation analytique d'un câble piézoélectrique en interaction avec les roues des véhicules	85
VII.1	INTRODUCTION.....	86
VII.2	MATÉRIAU PIÉZOÉLECTRIQUE	86
VII.2.1	Types de matériaux piézoélectriques	86
VII.2.1.1	Cristaux (Quartz par exemple)	86
VII.2.1.2	Céramiques	88
VII.2.1.3	Polymères.....	88
VII.2.1.4	Composites.....	89
VII.2.2	Effets qui peuvent exister dans un matériau piézoélectrique	90
VII.2.3	Types de déformations dans un matériau piézoélectrique	91
VII.2.3.1	Mode longitudinal (mode 33).....	92
VII.2.3.2	Mode transversal (mode 31 ou 32).....	92
VII.2.3.3	Mode cisaillement (ex : mode 15).....	93
VII.2.3.4	Mode épaisseur.....	93
VII.2.4	Coefficients caractérisant chaque type de déformation	94
VII.2.5	Équations fondamentales de la piézoélectricité	94
VII.3	SYSTÈME ÉTUDIÉ	96
VII.4	MODÉLISATION DE L'INTERACTION « ROUE-CÂBLE PIÉZOÉLECTRIQUE »	98
VII.4.1	Premier modèle	98
VII.4.1.1	Hypothèse	98
VII.4.1.2	Modèle du comportement élastique	98
VII.4.1.3	Modèle du comportement piézoélectrique	100
VII.4.1.4	Model Matlab Simulink.....	102
VII.4.2	Deuxième modèle.....	102
VII.4.2.1	Conditions aux limites.....	103
VII.4.2.2	Équations mécaniques.....	103
VII.4.2.3	Équations électriques	104
VII.4.2.4	Équation globale	104
VII.5	RÉSULTATS DE SIMULATION	106
VII.6	SYNTHÈSE.....	107
VIII.	CHAPITRE 4.....	108
	Approche de dimensionnement du capteur hybride et méthodes de caractérisation du trafic.....	108
VIII.1	INTRODUCTION.....	109
VIII.2	VARIABLES DU TRAFIC.....	109
VIII.2.1	Le débit.....	109
VIII.2.2	La concentration	109
VIII.2.3	Types de véhicules	109
VIII.2.4	Le temps d'occupation.....	110
VIII.2.5	La vitesse moyenne.....	110
VIII.2.6	Emplacement sur la chaussée	110
VIII.2.7	Distance longitudinale entre véhicules.....	110
VIII.2.8	Détection des incidents et des embouteillages	110
VIII.3	DIMENSIONNEMENT DU CAPTEUR HYBRIDE.....	110
VIII.3.1	Forme des boucles électromagnétiques	110
VIII.3.2	Dimensionnement des boucles électromagnétiques	111
VIII.3.3	Emplacement des boucles électromagnétiques	111
VIII.3.4	Dimensionnement du câble piézoélectrique	111
VIII.3.5	Choix du seuil de détection	112
VIII.4	MÉTHODES D'IDENTIFICATIONS DE VÉHICULES.....	112
VIII.4.1	Identification de véhicules par les boucles électromagnétiques	112
VIII.4.2	Identification de véhicules par le câble piézoélectrique	113

SOMMAIRE

VIII.4.3	Distinction entre un véhicule à 4 roues et un 2RM	115
VIII.4.3.1	Estimation du créneau de présence.....	115
VIII.4.3.2	Identification à base de l'analyse d'un créneau de présence	116
VIII.4.4	Identification des PL.....	117
VIII.4.5	Distinction entre les essieux d'un même véhicule et les essieux de véhicules différents	118
VIII.5	CONFIGURATION PROPOSÉE POUR UNE ROUTE À DEUX VOIES	118
VIII.5.1	Caractéristiques de la route	118
VIII.5.2	Hypothèses	118
VIII.5.3	Configuration proposée	119
VIII.5.4	Évaluation de la configuration proposée	120
VIII.5.4.1	Cas d'un trafic sans dépassement	120
VIII.5.4.2	Cas des dépassements.....	121
VIII.5.5	Algorithmes de détection.....	122
VIII.5.6	Avantages	122
VIII.5.7	Inconvénients	122
VIII.6	CORRECTION DE LA CONFIGURATION POUR UNE ROUTE À LIGNE DISCONTINUE.....	122
VIII.6.1	Hypothèses.....	123
VIII.6.2	Configuration proposée	123
VIII.6.3	Évaluation de la configuration proposée	123
VIII.6.4	Algorithmes de traitement.....	126
VIII.6.4.1	Emplacement des véhicules sur la chaussée	127
VIII.6.4.2	Mesure de la vitesse	127
VIII.7	SYNTHÈSE.....	128
IX.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	129
IX.1	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	130
IX.2	PERSPECTIVES.....	131
IX.2.1	Évaluation de la configuration sur un site contrôlé	131
IX.2.2	Modélisation de l'interaction entre une 2RM et une boucle électromagnétique.....	132
IX.2.3	Remplacement du câble piézoélectrique par des boucles électromagnétique.....	132
IX.2.4	D'autres perspectives	133
X.	ANNEXES.....	134
X.1	ANNEXE 1.....	135
L'ÉLECTRONIQUE ASSOCIÉE AUX BOUCLES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET AU CÂBLE PIÉZOÉLECTRIQUE.....		135
X.1.1	Introduction.....	136
X.1.2	L'électronique associée aux boucles électromagnétiques	136
X.1.2.1	Modélisation de la partie amplificateur.....	137
X.1.2.2	La fréquence d'oscillation de l'oscillateur	138
X.1.3	L'électronique associée au câble piézoélectrique	138
X.1.3.1	Circuit équivalent du câble	139
X.1.3.2	Circuit équivalent de l'amplificateur de tension	139
X.2	ANNEXE 2 :	141
L'ACQUISITION DES DONNÉES DE CAPTEUR HYBRIDE PAR LE DÉTECTEUR MIXTRA DE STERELA		141
X.3	ANNEXE 4	143
ALGORITHMES.....		143
X.3.1	Algorithme pour récupérer les signaux du câble	144
X.3.2	Algorithme pour récupérer les signaux des boucles	145
XI.	Bibliographie.....	Erreur ! Signet non défini.

NOMENCLATURE

I. Nomenclature

Acronymes

Abréviation	Désignation
ONISR	Observatoire National Interministériel de Sécurité Routière
METRAMOTO	MEsure du TRAFic des deux roues MOTOrisés pour la sécurité routière et l'évaluation des risques
CHyDS 2RMT	Capteur hybride pour la détection et le suivi des deux-roues-motorisées
UTBM	Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
IRTES	Institut de Recherche sur les Transports, l'Energie et la Société
SeT	Laboratoire Systèmes et Transport
CEREMA	centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
LED	Light emitting Diode
ANR	Agence nationale de recherche
Cete NC	Centre d'études Techniques de L'équipement Normandie-Centre
Ifsttar	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux
Litis	Laboratoire d'Informatique, du Traitement de l'Information et des Systèmes
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.
STERELA	Société Toulousaine d'Études et de Réalisations en Électronique et en Automatique
CETE	Centre d'études Techniques de L'équipement
I.C.T.A.A.L	Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison
A.R.P	Aménagement des routes principales
I.C.T.A.V.R.U	Instruction sur l'aménagement des voies rapides urbaines
VRS	voies du réseau structurant
VRNS	voies du réseau non structurant
ARNC	autoroutes non concédées
LACRA	liaisons assurant la continuité du réseau autoroutier
GLAT	grandes liaisons d'aménagement du territoire
R	Routes multifonctionnelles
T	Routes express
L	Autoroutes
T.P.C	Terre-plein central
B.D.G	Bande dérasée gauche
B.A.U	Bande d'arrêt d'urgence
I.T.P.C	Interruption du T.P.C
VRU	voies rapides urbaines

NOMENCLATURE

RN	Route nationale
RD	Route départementale
PTAC	poids total autorisé en charge
3RM	3 roues motorisés
VL	Véhicule léger
VU	Véhicule urbain
PL	Poids lourd
2RM	2 roues motorisés (motocyclette, cyclomoteur)
AV	Avant
AR	Arrière
2CV	Deux chevaux
DL	Développement limité
3D	tridimensionnel
FLUX3D	Logiciel de simulation des systèmes magnétique
Sensibilité	Rapport entre la variation de l'inductance propre de la boucle, et la valeur de l'inductance propre
GBF	Générateur de basses fréquences
BL	Type d'un câble piézoélectrique
PZT-PT	Zircono Titanate de Plomb
PVDF	Polyvinylidene difluoride
P(VDF-TrFE)	Copolymères : polyvinylidene fluoride-co-trifluoroethylene
BDD	Bande dérasée droite
G&D	Gauche et droite
4R	4 roues

Symboles Romains et Grecs

Ψ_{12} (Wb)	Flux mutule entre la boucle 1 et la boucle 2
I (A)	Courant électrique traversant la boucle enterrée dans le sol
M_{bv} (H)	Inductance mutuelle entre la boucle enterrée dans le sol et le châssis du véhicule
\vec{A} (T.m)	Vecteur potentiel magnétique
J (A/m ²)	Densité du courant
R (m)	Distance entre la source du champ magnétique et un point de l'espace
v (m/s)	vitesse de propagation de l'onde électromagnétique
ξ (F/m)	Permittivité électrique
\vec{J} (A/m ²)	module de la densité de courant
λ (m)	Longueur d'onde
f (Hz)	Fréquence du courant

NOMENCLATURE

$I dl$ (A.m)	Conteur de courant
\vec{B} (T)	Vecteur induction magnétique
α (degré)	Angle entre l'élément du courant $\vec{I} dl$ et \vec{r}
l (m)	Largeur de la boucle électromagnétique
L (m)	Longueur de la boucle électromagnétique
R (m)	Distance entre un élément de courant et le point de calcul
\vec{e}_i	Vecteur direction de 'i'
Ψ_{loop} (Wb)	Flux magnétique traversant la section de la boucle électromagnétique
r_c (m)	Rayon de la section du conducteur de courant
Z (m)	Projection de d'un point de l'espace sur l'axe z
z (m)	variable
r (m)	Distance entre le point M et l'extrémité d'une portion de la boucle
\vec{e}_x	Vecteur direction dans le sens de l'axe des x
ψ_{12} (Wb)	Flux mutuel entre deux boucles adjacentes
ψ_{P_2} (Wb)	Flux crée par la portion P_1 de la boucle 2, traversant la boucle adjacente 2
$Y1, Y2, Z1, Z2$ (m)	Coordonnées de la boucle sur le plan (y,z)
S_l (%)	Sensibilité d'une boucle
$\vec{B}l$ (T)	Vecteur induction magnétique crée par une portion d'une boucle
R (m)	Coordonnée cylindriques d'un point M situé à une distance R
φ_1 (degré)	angle
a	Constant
b	Constant
B_z (T)	Composante verticale du vecteur de l'induction magnétique
$I dl_\varphi$ (A.m)	élément de courant
R, a, ρ, z, r (m)	Distances
L_{boucle} (μ H)	Inductance propre d'une boucle
a (m)	Rayon de la boucle circulaire
k	constant
$K(k)$	Intégral elliptique de premier ordre
$E(k)$	Intégral elliptique de second ordre
$\vec{dl}_1 \vec{dl}_2$	Deux contours de courant
R_{12} (m)	Distance entre les deux contours

NOMENCLATURE

a, b, d, z (m)	Distances
H(m)	Hauteur (distance entre les centres des deux boucles)
C (m)	Distance séparant les deux plans des deux boucles
D (m)	Distance entre le milieu des boucles circulaires
β	constant
V	Fonction qui dépend de φ
ΔS_l (%)	Variation de la sensibilité
S_{l0} (%)	Valeur de base de la Sensibilité
V (V)	Tension électrique
r (ohm)	Résistance mesurée de la boucle électromagnétique
L (μ H)	Inductance mesurée de la boucle électromagnétique
ω (rd/s)	Fréquence du courant traversant la boucle
I (A)	Courant traversant la boucle
k_{ij}	coefficients de couplage électromécanique
v (m/s)	la vitesse de déplacement des particules dans le milieu
T (N/m^2) [6×1]	Contrainte mécanique : 3 contraintes longitudinales et 3 de cisaillements
E (V/m) [3×1]	Champ électrique
S (m) [6×1]	Déformation : 6 ondes longitudinales
D (C/m^2) [3×1]	Déplacement électrique ou induction
s (m^2/N)	Matrice de souplesse
s^E (m^2/N)	Matrice des souplesses mesurée à champ électrique constant ou nul
s_{ij}^E (m^2/N)	Constante de souplesse
d (C/N ou m/V)	Matrice des constantes piézoélectriques entre la charge et la contrainte
d^t (C/N ou m/V)	Transposé de la matrice des constantes piézoélectriques
d_{ij} (C/N ou m/V)	Constante piézoélectrique
ξ^S (F/m)	Matrice des permittivités mesurée à déformation constantes ou nulles
ζ^T (F/m)	Matrice des primitives mesurée à contrainte mécanique nulle ou constante
ξ_{ij}^T (F/m)	Constante de permittivité
$[\]^t$	Matrice transposé
c^D (N/m^2)	Matrice de rigidités mesurée à induction constantes
c^E (N/m^2)	Matrice de rigidités mesurée à champs électrique constants ou nul
c_{ij}^D (N/m^2)	Constante électrique à induction électrique constant

NOMENCLATURE

h (V/m ou N/C)	Matrice des constantes piézoélectriques qui traduit la proportionnalité entre la champ et la déformation
h_{ij} (V/m ou N/C)	Constante piézoélectrique
β^S (m/F)	Matrice des constantes d'imperméabilité mesurée à déplacement constant
e (C/m ² ou N/V.m)	Matrice des constantes piézoélectriques qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation
k_{ij}	Coefficient de couplage en mode latéral
F_z (N)	La composante verticale de la force qui agit dans le sens des z
t_{debut} (s)	Instant de début de traversé
t_{pic} (s)	Instant qui correspond au poids maximum
t_{fin} (s)	Instant de fin de traversé
t (s)	Variable temps
∂	Le signe du dérivé partiel
m (kg)	Masse
u	Onde longitudinale
\vec{F} (N)	Vecteur Force
$F(x)$	Force exercée à l'abscisse x
ρ (kg/m ³)	Densité de matériau
$Surf$ (m ²)	Surface de la section soumis à la force F
Σ	Signe somme
E	Module de Young du matériau
dl	Longueur de s'allongement du matériau
w	Pulsation de l'onde qui se propage dans le matériau
α	Constante qui dépend des conditions initiales
β	Constante qui dépend des conditions initiales
k	Constante
F_0	Force exercé à l'abscisse x
F_l	Force exercé à l'abscisse l

NOMENCLATURE

\dot{u}_0	Dérivée de u à l'abscisse 0
\dot{u}_l	Dérivée de u à l'abscisse l
V	Tension générée entre les deux électrodes
$U(l)$	Amplitude de l'onde u à l'abscisse l
$U(0)$	Amplitude de l'onde u à l'abscisse 0
E_i	Contrainte électrique dans le sens i
T_i	Contrainte mécanique dans le sens i
S_i	Déformation dans le sens i
p	Pression exercée
Q	Charges électriques
$surf$	Surface sur laquelle s'exerce la force d'une roue
c	Épaisseur du matériau
t_{11}	Instant correspond à S_{11}
S_{11}	Sensibilité de la boucle 1 à l'instant t_{11}
t_{12}	Instant correspond à S_{12}
S_{12}	Sensibilité de la boucle 1 à l'instant t_{12}
S_{lmin}	Sensibilité seuil
t_n	Instant n
S_n	Vecteur de sensibilité
n	Nombre de véhicule compté par la boucle 1
m	Nombre de véhicule compté par la boucle 2
S_{loops}	Sensibilité parasite entre boucles

II. Liste des Figures

Figure IV.1: Baisse de la mortalité selon la catégorie d'usagers	14
Figure IV.2: Structure du capteur hybride.....	16
Figure V.1: Profil d'une chaussée complète d'autoroute [18]	23
Figure V.2: châssis élémentaire [24].....	29
Figure V.3: Châssis tubulaire [25]	29
Figure V.4: Châssis plate-forme [26].....	30
Figure V.5: Châssis poutre [27]	30
Figure V.6: Châssis coque [28].....	31
Figure V.7: Châssis caisson [29].....	31
Figure V.8: Le châssis standard des véhicules PL	34
Figure V.9: Télémètre laser (Cete NC) [36].....	38
Figure V.10: Capteurs vidéo : a) mono-caméra (Néavia), b) stéréoscopique (Ifsttar).....	39
Figure V.11: Magnétomètres (Cete Ouest, CEA)	39
Figure V.12: Boucle électromagnétique en forme chevron	44
Figure V.13: Boucle électromagnétique en forme de palmier	45
Figure V.14: Boucle électromagnétique en forme de palmier-rectangulaire	45
Figure V.15: Boucle électromagnétique rectangulaire avec tête.....	46
Figure V.16: Boucle électromagnétique parallélogramme avec tête	46
Figure V.17: Boucle électromagnétique en forme de quadripôle	47
Figure VI.1: Partie du châssis considérée dans l'étude.....	50
Figure VI.2: Induction magnétique créé à partir d'une portion de fil	51
Figure VI.3: Un simulateur numérique sous Flux3D : Boucle circulaire/châssis.....	54
Figure VI.4: Boucle électromagnétique rectangulaire	55
Figure VI.5: Portion de fil.....	55
Figure VI.6: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation (obtenue analytiquement).....	58
Figure VI.7: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation (obtenue numériquement)	59
Figure VI.8: Dégradé de couleur qui représente la concentration des lignes de champ autour de la boucle.....	59
Figure VI.9: Deux boucles électromagnétiques rectangulaires adjacentes	60

TABLEAUX ET FIGURES

Figure VI.10 : Système équivalent 1	63
Figure VI.11: La composante normale de l'induction magnétique.....	64
Figure VI.12: Système équivalent de deux châssis en interaction avec une seule boucle.	68
Figure VI.13: Évolution du système équivalent selon le recouvrement de la boucle électromagnétique	68
Figure VI.14: Signature d'une voiture traversant une boucle rectangulaire	69
Figure VI.15: Différentes positions relatives du châssis par rapport à la boucle.....	70
Figure VI.16: Positions du début et de la fin de recouvrement.	70
Figure VI.17: Boucle électromagnétique circulaire	71
Figure VI.18: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation.....	74
Figure VI.19 : Système équivalent 2.....	74
Figure VI.20: Modèle utilisé pour calculer la sensibilité maximale entre la boucle circulaire et le châssis.....	75
Figure VI.21: Variation de la sensibilité en fonction de la hauteur du châssis	76
Figure VI.22 : Système équivalent 2.....	77
Figure VI.23: Signature d'un véhicule traversant une boucle circulaire.....	78
Figure VI.24: Variation de la sensibilité en fonction de la perméabilité	79
Figure VI.25: Calibrage du modèle analytique	80
Figure VI.26: Schéma du banc d'essai.....	81
Figure VI.27: Système de détection à base d'une boucle électromagnétique de forme rectangulaire	82
Figure VII.1: Apparition de la piézoélectricité dans un cristal (a) cristal centrocymétrique, (b) cristal non centrocymétrique	87
Figure VII.2: Classes des cristaux.....	87
Figure VII.3: Cellule PZT	88
Figure VII.4: Structure d'un polymère (a) conformation non polarisée, (b) conformation polarisée	89
Figure VII.5: Couplage électromécanique dans un matériau piézoélectrique.....	91
Figure VII.6: Directions de déformation dans un matériau piézoélectrique	91
Figure VII.7: Échantillon caractérisé par une déformation longitudinale.....	92
Figure VII.8: Échantillon caractérisé par une déformation transversale.....	92
Figure VII.9: Mode de cisaillement dans un échantillon	93
Figure VII.10: Mode épaisseur caractérisant un échantillon.....	93

TABLEAUX ET FIGURES

Figure VII.11: Constitution du câble piézo-électrique de type BL	96
Figure VII.12: Instants de présence et allure de force d'une roue qui se présente au-dessus d'un câble piézoélectrique.....	97
Figure VII.13: Une roue en interaction avec un câble piézoélectrique	98
Figure VII.14: Portion de câble subite la déformation.....	99
Figure VII.15: Modèle Simulink d'un câble piézoélectrique.....	102
Figure VII.16: Exemple d'un signal de tension généré par un câble piézo-électrique, soumis à une force ($m = 560$ kg).....	106
Figure VIII.1: Signature d'un VL et d'un VU.....	112
Figure VIII.2: Véhicule en interaction avec le câble piézoélectrique incliné	116
Figure VIII.3: Choc piézoélectrique produit par un PL (vitesse 80 km/h)	117
Figure VIII.4: Configuration 1	119
Figure VIII.5: Trafic normal	121
Figure VIII.6: Dépassement d'un 2RM	121
Figure VIII.7: Configuration optimisée du capteur hybride	123
Figure VIII.8: Boucle recouverte par deux véhicules	124
Figure VIII.9: Configuration utilisée pour la mesure des vitesses	128
Figure IX.1: Principe d'implantation d'un capteur hybride pour une route à 2 voies de circulation.....	131
Figure IX.2: Affectation de la sensibilité selon la position d'un 2RM	132
Figure 0.1: Système de détection à base de boucle électromagnétique de forme rectangulaire	136
Figure 0.2: Schéma équivalent d'un oscillateur électronique	137
Figure 0.3: Amplificateur d'un oscillateur quasi stationnaire.....	137
Figure 0.4: Circuit équivalent de l'oscillateur quasi-sinusoidal	138
Figure 0.5: Circuit équivalent du câble piézoélectrique.....	139
Figure 0.6: Circuit équivalent du câble piézoélectrique associé au détecteur électronique ...	139
Figure 0.7: Modèle électronique équivalent.....	139
Figure 0.1: Compteur de trafic MIXTRA	142

TABLEAUX ET FIGURES

III. Liste des Tableaux

Tableau IV.1: Personnes tuées selon les catégories d’usagers	15
Tableau V.1: Caractéristiques des routes VRS et VRNS	21
Tableau V.2: Questionnaires des différentes routes du réseau routier français (source au 1 ^{er} janvier 2011), source Ministère de l’Écologie	22
Tableau V.3: Caractéristiques d’un échantillon de VL de taille 4554106 véhicules	28
Tableau V.4: Caractéristiques des VU	32
Tableau V.5: Différents types de VU	32
Tableau V.6: Les poids des différents types des véhicules PL	33
Tableau V.7: Caractéristiques d’un échantillon de cyclomoteurs de taille 190870	34
Tableau V.8: Caractéristiques d’un échantillon de Motocyclette de taille 206906	34
Tableau V.9: Différentes formes de boucles électromagnétiques	43
Tableau VI.1: Variation de λ en fonction de la fréquence du courant	52
Tableau VI.2: Valeurs de l’inductance propre de plusieurs boucles rectangulaire (μH)	57
Tableau VI.3: Variation de la sensibilité entre boucles adjacentes, en fonction de la distance de séparation.....	62
Tableau VI.4: Variation de la sensibilité maximale d’une boucle rectangulaire de dimensions (1,75 ; 1,5) m ²	69
Tableau VI.5: Extension du sommet pour différentes vitesses.....	71
Tableau VI.6: Inductance propre de plusieurs boucles circulaires.....	73
Tableau VI.7: Variation de la sensibilité parasite en fonction de la distance de séparation	78
Tableau VI.8: Extension du sommet pour différentes vitesses.....	79
Tableau VI.9: Relevés expérimentaux 1	81
Tableau VI.10: Relevés expérimentaux 2	81
Tableau VI.11: Valeurs mesurées pour deux recouvrements.....	83
Tableau VI.12: sensibilités mesurées pour deux recouvrements	83
Tableau VII.1: Scénarios câble-roues	97
Tableau VII.2: Tension électrique générée (simulation et expérimentale)	107
Tableau VIII.1: Temps de présence de plusieurs véhicules en ms.....	113
Tableau VIII.2: Différents chocs piézoélectriques pour différents véhicules ($v=90$ km/h)...	115
Tableau VIII.3: Chocs produits par un 2RM et un 4RM.....	117
Tableau VIII.4: Les distances de sécurité réglementaires pour différentes vitesses	118

TABLEAUX ET FIGURES

Tableau VIII.5: Sensibilité de plusieurs véhicules pour un recouvrement de 50 %	119
Tableau VIII.6: Scénarios qui peuvent se reproduire sur une chaussée.....	120
Tableau VIII.7: Différentes positions d'un véhicule sur la chaussée.....	125
Tableau VIII.8: Quelques scénarios qui décrivent l'interaction véhicules-câble.....	126
Tableau VIII.9: Exemples de scénarios.....	127

IV. INTRODUCTION GÉNÉRALE

IV.1 Problématique

Depuis plusieurs années, la sécurité routière enregistre des résultats encourageants en matière d'accidentologie [1].

Les chiffres de l'insécurité routière publiés par l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière (ONISR) montrent que la mortalité a reculé de 44,3 % depuis 2002 [2] [3]. Au-delà de ce chiffre global, il apparaît que cette évolution est différente d'une catégorie à une autre comme présenté sur la Figure IV.1 [2].

Ce sont les véhicules de tourisme qui ont bénéficiés le mieux de la politique de sécurité routière ce qui a engendré une réduction du nombre de personnes tuées à plus de 55 % durant six ans. De même pour les piétons et les cyclistes qui ont bénéficiés d'une baisse de 40 % et de 30 % successivement durant cette même période.

Cependant, il apparaît aussi que le bilan est moins positif pour les deux-roues motorisés. En effet, les chiffres de l'ONISR montrent que le nombre des 2RM tués (cyclomoteurs et motocycles) n'a été réduit que de 24 % depuis 2002 [2].

La Figure IV.1 présente le retard envisagé sur la catégorie 2RM par rapport à la baisse générale de la mortalité.

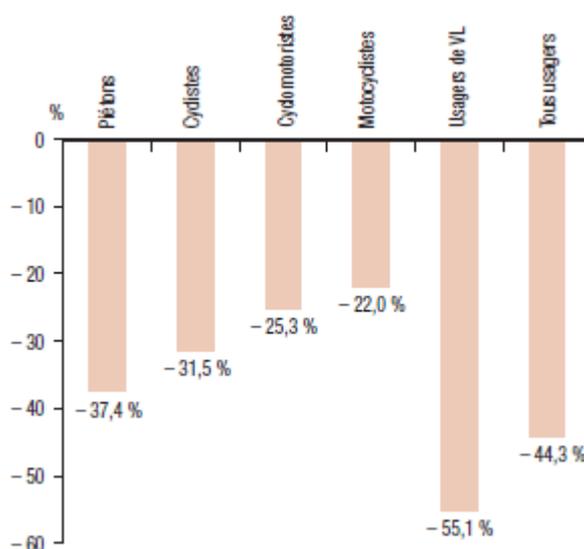


Figure IV.1: Baisse de la mortalité selon la catégorie d'usagers [2]

En termes de personnes tuées et en 2008, les chiffres de l'ONISR montrent que les usagers des 2RM représentent 35 % des tués alors que les usagers des véhicules légers représentent près de 51 % [3].

En considérant la gravité des accidents, les 2RM représentent 35 % des blessés hospitalisés par comparaison aux véhicules légers qui représentent 40 % [2].

Ces chiffres traduisent le danger qui expose aux usagers des 2RM malgré que leur population n'est pas importante par comparaison avec d'autres.

Le Tableau IV.1 synthétise le nombre de personnes tuées pour chaque catégorie d'usagers.

INTRODUCTION GENERALE

Année 2008	Personnes tuées
Cyclomoteurs	313
Motocyclettes	844
Véhicules légers	2256
Poids lourds	76

Tableau IV.1: Personnes tuées selon les catégories d'usagers [2]

Au vu des statistiques présentées précédemment, il a été nécessaire de développer des outils technologiques visant à accroître significativement la connaissance de l'usage de ce type de déplacement afin d'améliorer la détermination du risque; et par la suite le renforcement des moyens de sécurité.

La littérature fournit quelques références qui illustrent la difficulté de détecter les 2RM dans le trafic [1]. La principale raison est que les usagers des 2RM adoptent des comportements de conduite aléatoires, différents des automobiles et véhicules lourds, qui dépendent à la fois des conditions d'écoulement de trafic et de leur petit gabarit. Ces usagers peuvent franchir des lignes continues ou se positionner à des endroits de la route interdits normalement à la circulation.

Actuellement, la détection des 2RM dans le trafic repose sur l'analyse de séquences d'images généralement réalisées manuellement par des opérateurs. Cette technique gourmande en temps et limitée en terme de détection, ralentit grandement le développement des études relatives à leur circulation. Le développement de certaines autres techniques de détection et de suivi des 2RM est limité par leurs fortes dépendances aux conditions climatiques. En effet, plusieurs de ces techniques sont très sensibles à la pluie, à la lumière, à la neige, au brouillard, etc. Il est donc nécessaire de développer une technique automatique résistante aux conditions météorologiques et pouvant fonctionner de jour comme de nuit. Elle doit également tenir compte du comportement aléatoire des usagers, même si ces derniers se trouvent dans des zones interdites à la circulation.

Cette problématique a été le sujet principal du projet METRAMOTO, qui avait pour objectif d'une part d'étudier le comportement individuel des conducteurs des 2RM sur la route et de proposer un système prédictif et sélectif capable de les détecter, et d'autre part de mettre en évidence leurs remontées de files dans le trafic général.

Le projet METRAMOTO est issu de l'appel à projet ANR « Véhicules pour les Transports Terrestres, édition 2010 ». Il s'inscrit dans l'axe thématique efficacité des systèmes de transport et augmentation de leur qualité. Il concerne le sous-axe « sécurité et sûreté des transports ». Il s'adresse aux thèmes relatifs à la sécurité routière, en particulier l'un des principaux points durs actuels qui sont les deux-roues-motorisés (2RM) en proposant des solutions technologiques pour une meilleure prise en compte de ces usagers vulnérables [1].

Dans le cadre de ce projet, quatre technologies de capteurs de trafic sont abordées et traitées en parallèle par les partenaires. Il s'agit des technologies de traitement d'image, de télémétrie laser, de magnétomètre et de boucles électromagnétiques associées à des capteurs

INTRODUCTION GENERALE

piézo-électriques (capteurs hybrides). Nous détaillerons les différentes technologies développées dans ce projet, dans le premier chapitre.

Le laboratoire Systèmes et Transport (SeT) de l'Institut de Recherche sur les Transports, l'Énergie et la Société (IRTES) de l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), en collaboration avec CEREMA Ile-De-France se sont engagés à travers ce projet, à apporter leurs contributions scientifiques et techniques aux plans de la recherche appliquée dans le domaine de la sécurité routière. Ces deux structures sont intervenues dans le développement du capteur hybride. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'une thèse de doctorat qui s'est déroulée au sein du laboratoire IRTES-SeT de l'UTBM.

La Figure IV.2, présente une structure de base à partir duquel, nous devons dimensionner, optimiser et concevoir le capteur hybride. La stratégie de détection choisie consiste à ne plus détecter les 2RM par les boucles électromagnétiques.

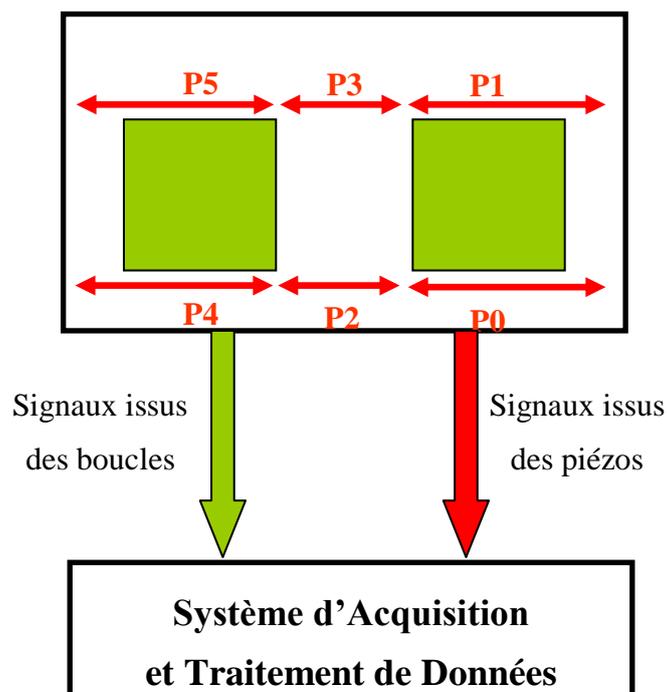


Figure IV.2: Structure du capteur hybride

Aujourd'hui le dimensionnement des systèmes de détection à base de boucles électromagnétiques ou de câble piézoélectrique, se fait de manière expérimentale [1]. Les développeurs procèdent à des essais sur terrain pour optimiser la structure convenable pour une application précise [1] [8]. Bien que cette approche soit précise, mais elle présente quelques inconvénients. En effet, l'obtention d'un résultat convenable nécessite plusieurs séries d'essais, et donc plusieurs types de véhicules pour reproduire les différents scénarios du trafic, ce qui n'est pas facile à réaliser [9]. De plus, les essais nécessitent différents sites contrôlés pour tenir compte de la diversité du réseau routier, ce qui est très coûteux. Nous notons aussi la difficulté de reproduire quelques scénarios dangereux [10].

Pour ces raisons, les autorités souhaitent trouver une autre solution qui soit moins coûteuse et plus sécurisée que la mise en place de toute une série d'essais très gourmands en temps.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, la solution qui semble être la mieux adaptée est l'établissement d'une approche théorique à base de modèles analytiques et numériques. Cette approche devra répondre au problème fixé : le dimensionnement d'un capteur de trafic pour une route donnée. Ces modèles devront permettre de simuler les différentes interactions qui ont lieu entre les véhicules et le capteur hybride. Nous signalons l'absence de travaux antérieurs qui visent à dimensionner un tel capteur par la théorie.

Le problème majeur des méthodes numériques est le temps de simulation. Cette contrainte indésirable devient plus gênante pour des systèmes de grande dimension (cas du capteur hybride).

Par ailleurs, l'approche analytique présente plusieurs avantages en termes de temps, de coût et de sécurité, mais malgré cela elle présente quelques difficultés. Les modèles devront prendre en compte les caractéristiques des véhicules ainsi que celles des routes. Donc, nous devons recueillir toutes les caractéristiques de tous les types de véhicules circulants sur le réseau routier. De même, nous devons connaître les caractéristiques des différentes routes, surtout celles fréquentées par les 2RM, pour que le capteur soit adapté à la plupart des routes constituant le réseau routier.

Bien que le code de la route n'autorise la circulation que sur des portions précises de la route, malheureusement certains usagers, et surtout les utilisateurs de 2RM, ne respectent pas ces règles. Ce phénomène récurrent s'ajoute au cahier de charge du capteur à dimensionner.

Le capteur de trafic présenté dans la Figure IV.2 est raccordé à un détecteur électronique qui se comporte comme une interface. Ce détecteur traduit les changements des caractéristiques du capteur par une variation d'un de ces paramètres. Néanmoins, la variation indiquée par le détecteur n'est pas égale à la variation engendrée au niveau du capteur. Nous devons donc établir le rapport entre les variations engendrées dans les deux niveaux du système (capteur et détecteur). Ce rapport est nécessaire pour valider les résultats expérimentalement.

Les performances d'un tel système devront permettre de pouvoir discriminer les 2RM des autres véhicules. Toutefois, pour répondre au contexte d'optimisation, de nombreuses solutions devront être discutées, sur la base du travail de modélisation, prenant en considération des critères de précision, fiabilité et coût.

Pour compléter l'étude, un traitement des données issues des boucles électromagnétiques ainsi que des câbles piézoélectriques devra être fait afin d'identifier le type de véhicule. Ainsi, il est important de reformuler ces méthodes de traitement dans des algorithmes qui pourront être exploités dans la suite de ce travail en traitement en temps réel.

IV.2 Organisation du document

Les travaux de cette thèse se répartissent en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons commencé par définir les caractéristiques des différents éléments qui constituent en quelques sortes le cahier de charge du capteur étudié. Ensuite, nous avons présenté l'état de l'art sur les différentes techniques de détection et de suivi de véhicules dans le trafic ainsi que les différentes formes de boucles électromagnétiques utilisées dans la réalisation des capteurs de trafic. Cela, nous a permis d'expliquer les raisons du choix de la technique et des éléments du capteur.

INTRODUCTION GENERALE

Le deuxième chapitre donne toute la méthodologie mise en place pour établir des modèles électromagnétiques qui décrivent le système composé de boucles électromagnétiques et de véhicules ainsi que les différentes interactions qui auront lieu entre ces éléments.

Le troisième chapitre est consacré à la définition des modèles analytiques électromécaniques développés pour caractériser l'interaction entre le câble piézoélectrique et les roues des différents véhicules.

Dans le dernier chapitre nous présentons les démarches conduisant au dimensionnement du capteur de trafic. Ensuite, nous proposons une approche de traitement des résultats issus du capteur. Enfin, différentes configurations retenues pour des routes données sont présentées.

V. CHAPITRE 1

Généralités sur les routes et les véhicules, état de l'art sur les techniques de détection et de suivi du trafic, état de l'art sur les boucles électromagnétiques.

Résumé :

Le dimensionnement du capteur hybride dépend des caractéristiques des routes et des véhicules. Dans ce chapitre nous présenterons une étude bibliographique sur le réseau routier français ainsi que les caractéristiques des véhicules en circulation. Ensuite, un état de l'art sur les différentes techniques de détection et de suivi du trafic sera présenté. Nous finirons par un recueil des différentes boucles électromagnétiques existantes. Cette étude nous a permis de choisir la forme des boucles la plus appropriée pour la suite des travaux de cette thèse.

V.1 Introduction

Ce chapitre introduit aux différentes configurations des routes considérées dans la littérature et présente les différentes catégories de véhicules pris en charge par l'étude. Nous commençons par une présentation détaillée de l'infrastructure routière en France. Puis, nous présentons les caractéristiques des véhicules en circulations. Ensuite, nous présentons les différentes techniques de détections et de suivi du trafic. Enfin, nous présentons une étude bibliographique très exhaustive sur les différentes formes de boucles électromagnétiques utilisées dans la réalisation de capteurs de trafic. Ce travail nous a permis d'identifier les configurations de boucles les plus appropriées pour la réalisation du système hybride.

V.2 Infrastructure routière en France

Le réseau routier est l'ensemble des circulations terrestres permettant le transport par véhicules routiers, et en particulier, les véhicules motorisés (véhicules légers, deux-roues motorisé, autocars et poids lourds, etc.). A travers cette étude, nous visons à mieux connaître les différents types de routes, leurs portions, leurs dimensions et d'autres propriétés de circulation qui entrent dans le dimensionnement du capteur hybride.

V.2.1 La doctrine routière

La diversité des gestionnaires de routes a amené les autorités publiques à établir une doctrine routière afin d'unifier les critères et de faciliter les choses. La doctrine routière est définie comme étant l'ensemble des instructions techniques qui s'imposent sur le réseau routier et qui permet d'unifier les différents aménagements des routes. L'élaboration de ces instructions a comme objectif le renforcement de la sécurité des usagers et de la capacité des infrastructures à écouler un trafic envisagé [11]. L'aménagement des différentes routes constituant le réseau routier français sont soumis à trois instructions ministérielles [12] :

- La première instruction concerne les routes à caractère autoroutier
- La deuxième instruction concerne les routes à caractère urbain
- La troisième instruction concerne les à caractère interurbain

Ces instructions fixent les règles à respecter pour aménager les trois éléments de conception suivants :

- le tracé en plan, une projection de la route sur un plan horizontal
- le profil en long, une projection de l'axe de la route sur un plan vertical
- le profil en travers, une coupe suivant un plan vertical perpendiculaire à l'axe

V.2.2 Différents types de routes

Le réseau routier français regroupe plus d'un million de kilomètres de routes diverses [13]. Chaque route est caractérisée par ses propres dimensions et propriétés de circulation. L'importance d'une route définit le type de gestionnaire, qui peut être l'État, les collectivités territoriales ou des sociétés concessionnaires. Concernant la classification des voies, plusieurs classifications peuvent être établies, selon leurs gestionnaires, leurs caractéristiques techniques ou d'autres.

Les autorités françaises regroupent les routes qui constituent le réseau routier en deux catégories, des voies du réseau structurant, notées VRS et des voies du réseau non structurant, notées VRNS [14]. La catégorie des deux structures se différencie, vis-à-vis du nombre de chaussée, dimensionnement et autres.

CHAPITRE 1

Les VRS comprennent :

- VRU voies rapides urbaines
- ARNC autoroutes non concédées
- LACRA liaisons assurant la continuité du réseau autoroutier
- GLAT certaines grandes liaisons d'aménagement du territoire

Les VRNS comprennent :

- les artères interurbaines et autres routes
- les autres GLAT et les routes nationales qui n'entrent pas dans les catégories précédentes

Dans cette catégorie, on trouve :

- les routes départementales
- les routes communales
- les voiries agricoles
- les voiries forestières
- les voiries viticoles
- les voiries de lotissements
- les aires de trafic industrielles
- les aires de stationnements

Le Tableau V.1 regroupe les différents types de routes VRS et VRNS ainsi que leurs caractéristiques.

Types de routes	R (Routes)	R (Artères interurbaines)	T (transit) (Routes express)	L (liaison) (Autoroutes)
Nombre de chaussées	1 chaussée (à 2 ou 3 voies)	2 chaussées	1 chaussée (à 2 ou 3 voies)	2 chaussées
Carrefours	plans ordinaires, ou giratoires	giratoires ou plans sans traversée du T.P.C	dénivelés	Dénivelés
Accès	selon les cas, sans accès ou accès possibles	si accès, pas de traversée du TPC	sans accès riverains	sans accès riverains
Limitation de vitesse hors agglomération	50 km/h	90 km/h	90 km/h ou 110 km/h	130 km/h ou 110 km/h
Traversée d'agglomération	oui, éventuellement	oui, éventuellement	non	Non
Domaine d'emploi	liaison à courte ou moyenne distance	liaison à courte ou moyenne distance	liaison à moyenne ou grande distance	liaison à moyenne ou grande distance
Trafic à terme	trafic moyen (1 chaussée)	fort trafic (2 chaussées)	trafic moyen	fort trafic
Type de sécurité	voies principales en milieu rural	voies principales en milieu rural	voies isolées de leur environnement	voies isolées de leur environnement

Tableau V.1: Caractéristiques des routes VRS et VRNS [15]

CHAPITRE 1

Le capteur visé par cette étude sera consacré aux routes à moyen et à fort trafic. Ces routes sont caractérisées par un nombre considérable de deux roues motorisés (2RM) qui y circulent. Les caractéristiques des autres routes à faible trafic ne seront pas détaillées dans ce chapitre car elles ne rentrent pas dans notre étude.

Une route est dite à faible trafic lorsque le nombre de véhicules qui y circulent est inférieur à l'équivalence de 150 poids lourds par jours, soit environ 1500 véhicules par jours, tous modèles confondus [16]. Cette appellation recouvre un très grand nombre de routes. Le réseau routier français totalise environ 1 000 000 km dont seulement 12% pour les routes à moyen et à fort trafic. Ce qui veut dire que 88 % du réseau routier est soumis à un trafic faible ou très faible.

V.2.3 Gestionnaires des routes

Les routes peuvent aussi être classées selon le type de gestionnaire. La gestion du réseau routier est de la responsabilité des collectives publiques qui sont : l'État, les départements et les communes [13]. Certaines routes particulières sont concédées à des entreprises privées [13]. Nous définissons dans le Tableau V.2 le gestionnaire de chaque type de route ainsi que sa longueur.

Une route nationale (RN) est une route de grande importance reliant à la capitale les villes principales ou reliant les villes principales entre elles et qui est construite et entretenue aux frais de l'État. Suite à une réforme datée l'année de 2006, la plupart des RN ont été transférées en routes départementales.

Une route départementale (RD) est une route de moyenne importance reliant le chef-lieu aux principales villes du département et dont la construction et l'entretien incombe au département. Les routes départementales forment un réseau complémentaire des autoroutes et des routes nationales qui regroupe actuellement la grande majorité des axes routiers français (hors voies communales).

Une voie communale (ou voirie communale) est une route ou un chemin à l'échelle locale. Ce type d'infrastructure est géré par les différents conseils municipaux de chaque commune.

Routes concernées	Gestionnaire	Kilométrage
Autoroutes concédées	Sociétés concessionnaires d'autoroutes	8 581 km
Autoroutes non concédées	L'État : Ministère de l'Écologie (Direction Interdépartementale des Routes)	2 732 km
Routes nationales	L'État : Ministère de l'Écologie (Direction Interdépartementale des Routes)	9 768 km
Routes départementales	Départements	377 986 km
Routes communales	Communes	642 256 km

Tableau V.2: Gestionnaires des différentes routes du réseau routier français (source au 1 er janvier 2011), source Ministère de l'Écologie

V.2.4 Aménagement d'une route considérée comme référence

La route considérée comme référence est de type autoroute. Cette route est caractérisée par un aménagement complet dont aucun autre type de route ne dispose. Le profil donné par la

CHAPITRE 1

Figure V.1 représente les différentes portions constituant cette route. Pour d'autres types de routes, ces portions peuvent exister ou non. Notons que plus le trafic est dense, plus le nombre d'éléments constituant la voie est multiplié. En effet, ces éléments complémentaires renforcent la sécurité des usagers surtout quand la vitesse autorisée est grande et quand le trafic est dense.

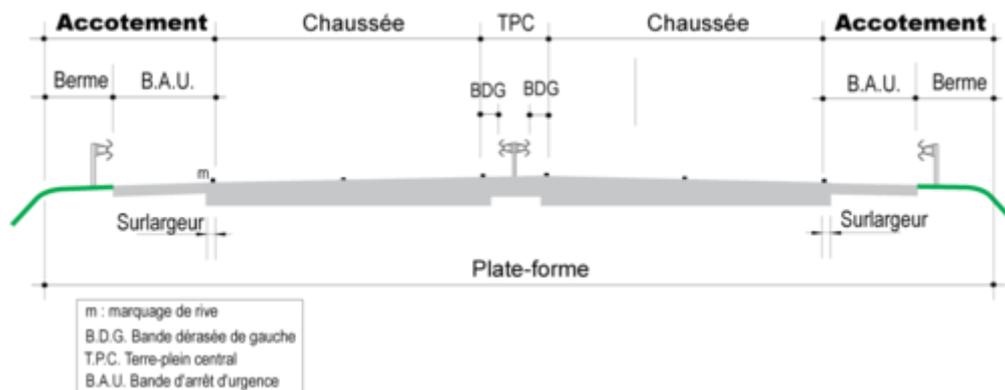


Figure V.1: Profil d'une chaussée complète d'autoroute [17]

Le profil représenté par la Figure V.1 regroupe les éléments suivants :

a) Les chaussées

La chaussée est la zone de la route dédiée à la circulation des véhicules dans des situations normales, et en respectant le code de la route. Chaque chaussée comporte de 2 à 4 voies de circulation larges de 3,5 m. Le nombre de voies de circulation est variable selon le volume de circulation et les niveaux de services attendus. Le dimensionnement du capteur hybride dépend principalement des dimensions de la chaussée.

b) Le terre-plein central (T.P.C.)

Le T.P.C. est la terre médiane située entre deux chaussées. Il assure la séparation matérielle des deux sens de circulation. Cette séparation empêche les mouvements de tourne-à-gauche et de tourne-à-droite ce qui permet de garder le trafic plus fluide. Il est constitué de deux éléments : les deux bandes dérasées et la bande médiane.

Ses dimensions se varient d'une route à une autre. Elles dépendent essentiellement du milieu traversé, des fonctions de la route et de la limitation de vitesse. En contexte urbain ou périurbain, le T.P.C. sera peu large, délimité par des bordures hautes, verticales de préférence. En rase campagne, le T.P.C. peut être d'une largeur allant jusqu'à 12 m.

La bande dérasée de gauche (B.D.G.) est destinée à permettre de légers écarts de trajectoire et à éviter les barrières de sécurité installées sur la bande médiane. Elle est dégagée de tout obstacle, revêtue et se raccorde à la chaussée sans dénivellation. Sa largeur varie entre 0.5 et 1 m selon si on est en urbain ou en rase campagne. Cette portion de route n'est pas utilisée par les usagers si les règles de circulations sont respectées. Néanmoins, quelques conducteurs peuvent la franchir lors de dépassements ce qui nous oblige à le prendre en considération dans le dimensionnement du capteur.

La bande médiane (séparateur central) sert à séparer physiquement les deux chaussées et à implanter certains équipements. Elle se raccorde à la chaussée via une dénivellation ce qui empêche les usagers de la franchir.

c) Les zones de sécurité (accotement)

La zone de sécurité comprend par définition une bande dérasée (ou bande d'arrêt d'urgence (B.A.U.)) et une berme enherbée.

La bande d'arrêt d'urgence (B.A.U) est considérée comme une extension de la chaussée qui permet de récupérer des véhicules déviés de leurs trajectoires. En cas d'un danger probable, la BAU peut servir en des manœuvres d'évitement ou d'arrêts. Elle peut être utilisée pour faciliter les entretiens de la chaussée. La BAU peut avoir les largeurs suivantes :

- 1,75 m ou 2 m pour les routes de type R
- 2,5 pour les routes de type T
- 3 m pour lorsque le trafic poids lourd excède 2 000 v/j

La berme est la partie de la terre située à une altitude définie à droite de la chaussée. Elle participe à l'isolation physique de la chaussée et elle supporte les barrières de sécurité ainsi que les plaques de signalisations. Sa largeur est de 1 m minimum.

V.2.5 Caractéristiques des différentes routes

Mis à part la chaussée, les éléments cités précédemment dans le paragraphe II.2.4 peuvent être ou non des portions constitutives de la route, tout dépend du type de la route. Les différentes caractéristiques techniques sont fixées selon les conditions imposées par la géographie des lieux de manière à satisfaire le besoin des citoyens. Nous présenterons dans cette partie les différents éléments qui différencient les quatre types de routes suivants : les autoroutes, les voies rapides, les artères interurbaines et les routes communales. Il existe d'autres types de routes, telles que les routes agricoles et les routes forestières, mais le capteur visé dans cette étude ne sera pas installé sur ce type de routes, car elles sont rarement fréquentées par les véhicules, surtout les 2RM.

V.2.5.1 Caractéristiques des Autoroutes

Les routes de type autoroutes ont été considérées comme une référence dans cette étude car leur aménagement est complet. Les éléments cités dans le paragraphe II.2.4 entrent tous dans la constitution des autoroutes.

Selon l'article L122-1 du code de la voirie routière, les autoroutes sont décrites comme suit : "les autoroutes sont des routes sans croisement, accessibles seulement en des points aménagés à cet effet et réservés aux véhicules à propulsion mécanique" [18] [19].

On notera également que, selon l'article L122-2 du code de la voirie routière, "les propriétés riveraines des autoroutes n'ont pas d'accès direct à celles-ci.". De même pour les deux roues [18] [19].

Les autoroutes sont conçues pour une vitesse de 150 km/h. Néanmoins, le code de la route limite la vitesse sur ce type de route à 130 km/h (110 km/h pour les autoroutes en relief difficile ou en milieu urbain) pour renforcer la sécurité des usagers [20].

V.2.5.2 Caractéristiques des routes express (ou voies rapides) (VRU)

Le statut de route express est défini par le code de la voirie routière. Il désigne des routes avec chaussées séparées d'au moins deux voies dans chaque direction. Ce statut peut concerner les routes nationales, départementales ou communales [20].

CHAPITRE 1

Une route express est à l'origine une route de type autoroutier qui présente des caractéristiques moins performantes que les autoroutes. En effet, quelques routes qui ont ce statut possèdent un aménagement moins complet. À titre d'exemple ; absence de BAU et présence de carrefours non dénivelés.

Les routes express bénéficient en générale d'une vitesse limitée à 110 km/h [20].

V.2.5.3 Caractéristiques des artères interurbaines (R)

Les artères interurbaines font partie des routes de type R (multifonctionnelles). Elles assurent des liaisons à courte ou à moyenne distance en traversant les agglomérations [18]. L'aménagement de ces routes est moins complet que les routes de type autoroute. D'autres points qui différencient ce type de routes des autoroutes sont :

- des dimensions moins étendus (ex. bandes de sécurités réduites)
- présence des échangeurs à niveau
- des routes non isolées de leur environnement
- une vitesse maximale de 90 km/h

V.2.5.4 Caractéristiques des routes communales

Une route communale est une route qui traverse l'agglomération. Elle est accessible à toutes les modes de traction couramment utilisés dans la commune y inclus les deux roues non motorisés. Pour cela elle doit avoir des caractéristiques qui permettent leur circulation en les assurant la sécurité.

L'aménagement d'une route communale est beaucoup moins simplifié. Une chaussée avec deux bandes de sécurité gauche et droite de 0,5 m de largeur chacune. Dans quelques portions, même les deux bandes de sécurités sont éliminées. Par contre, dans tous les cas une voie communale ne doit avoir une largeur de plate-forme inférieure à 8 mètres. La largeur de la chaussée ne doit pas être inférieure à 5 mètres. La vitesse maximale autorisée en agglomération est de 50 km/h. Cette limitation peut être réduite jusqu'à 20 km/h devant les écoles et les zones de rencontres.

V.2.6 Synthèse du travail sur les routes

L'étude bibliographique effectuée sur les routes montre que le dimensionnement du capteur hybride dépend des facteurs de la route, suivants :

- le type de la chaussée (séparée ou non)
- Le nombre de voies
- le sens des voies (sens unique, double sens ou multisens)
- la largeur de la chaussée
- la BAU (sa largeur, son existence)
- la BDG (sa largeur, son existence)

Nous avons établi une classification des différentes routes pour lesquelles les principaux critères discriminants étaient la séparation ou non des flux de sens opposés et le nombre de voies. Les types de route qui sont identifiés sont les suivants :

- Route à chaussées séparées :
 - Une seule voie par chaussée
 - Deux voies à sens unique par chaussée

CHAPITRE 1

- Trois voies à sens unique par chaussée
- Multivoies à sens unique par chaussée
- Route à une seule chaussée :
 - Une seule voie
 - Deux voies à sens unique
 - Deux voies à double sens
 - Trois voies à sens unique
 - Trois voies dont une à sens opposé

L’Instruction interministérielle sur la sécurité routière déconseille de marquer systématiquement l’axe d’une chaussée de largeur inférieure à 5,20 m. Si beaucoup de routes départementales et communales ont une largeur de 5 m au moins, il est clair que cela impose une forte gêne pour les véhicules qui se croisent, devant alors empiéter sur les accotements.

Pour les routes nationales de type autoroutes, routes express et routes interurbaines, le code de la route adopte le principe d’une largeur de voie de 3,50 m. Dans certaines circonstances, on peut néanmoins être amené à des voies plus étroites, même sur le réseau national. C’est le cas notamment [18] [19] [17] :

- sur les routes à faible trafic, ou en cas de fortes contraintes de site, une largeur de voie de 3 m pouvant alors être acceptée
- lors de traversées d’agglomérations, pour lesquelles un rétrécissement des voies incite les véhicules à ralentir ; une largeur de voie de 3 m doit y être considérée comme normale
- sur les ouvrages d’art, ponts et tunnels, où le coût du mètre carré est très élevé et, de façon générale
- dans les virages de rayon inférieur à 200 m, une surlargeur doit à l’inverse être prévue pour permettre l’inscription des véhicules longs.

V.3 Véhicules

Le réseau routier français est caractérisé par une diversité importante en termes de constructeurs des véhicules. Cette diversité s’est traduite en plusieurs marques de véhicules. La présente étude bibliographique a pour objectif de recueillir les différentes caractéristiques des différentes marques. Dans un premier temps, nous présenterons les différentes classes de véhicules. Ensuite, nous présentons pour chaque classe les caractéristiques dont on a besoin dans le dimensionnement.

V.3.1 Les différentes classes de véhicules

Les autorités françaises ont établi un classement des véhicules qui se base sur trois critères [21] :

- La hauteur totale du véhicule ou de l’ensemble roulant
- Le poids total autorisé en charge (PTAC). Pour les ensembles roulants, seul le PTAC du véhicule tracteur est pris en compte.
- Le nombre d’essieux au sol du véhicule ou de l’ensemble roulant

En appliquant ces critères sur les différents types de véhicules, nous pouvons distinguer cinq classes de véhicules :

CHAPITRE 1

V.3.1.1 Classe 1 : véhicules légers, véhicules ou ensembles roulants

Les caractéristiques de ce type de véhicules sont les suivantes :

- Véhicule ayant une hauteur totale inférieure ou égale à 2 mètres, d'un PTAC inférieur ou égal à 3,5 tonnes.
- Ensemble roulant ayant une hauteur totale inférieure ou égale à 2 mètres avec un véhicule tracteur d'un PTAC inférieur ou égal à 3,5 tonnes

V.3.1.2 Classe 2 : véhicules intermédiaires, véhicules ou ensembles roulants

Les caractéristiques de ce type de véhicules sont les suivantes :

- Véhicule ayant une hauteur totale supérieure à 2 mètres et inférieure à 3 mètres, d'un PTAC inférieur ou égal à 3,5 tonnes
- Ensemble roulant ayant une hauteur totale supérieure à 2 mètres et inférieure à 3 mètres avec un véhicule tracteur d'un PTAC inférieur ou égal à 3,5 tonnes

V.3.1.3 Classe 3 : poids lourds et autocars à 2 essieux, véhicules à 2 essieux

Cette classe englobe tout véhicule à 2 essieux ayant : soit une hauteur totale supérieure ou égale à 3 mètres, soit un PTAC supérieur à 3,5 tonnes

V.3.1.4 Classe 4 : poids lourds et autocars à plus de 2 essieux, véhicules ou ensembles roulants à 3 essieux et plus

Les caractéristiques de ce type des véhicules sont les suivantes :

- Véhicules à trois essieux, et plus, ayant une hauteur supérieure ou égale à 3 mètres ou un PTAC supérieur à 3,5 tonnes.
- Ensemble roulant ayant une hauteur totale supérieure ou égale à 3 mètres
- Ensemble roulant avec un véhicule tracteur d'un PTAC supérieur à 3,5 tonnes

V.3.1.5 Classe 5 : 2RM, 3RM (side-cars, trikes)

Dans cette classe nous trouvons les trikes d'une puissance supérieure 15 kW, dont le poids à vide dépasse les 550 Kg, les motocyclettes (cylindrée supérieure ou égale à 125 cm³) et les cyclomoteurs (cylindrée inférieure à 125 cm³).

V.3.2 Caractéristiques des différentes catégories de véhicules

Après avoir présenté les différentes catégories des véhicules circulants sur le réseau routier français, nous présentons dans cette section les caractéristiques de chaque type de véhicule. Ces caractéristiques vont ensuite alimenter la base de données des outils de simulations qui seront développés dans les chapitres suivants.

V.3.2.1 Caractéristiques des véhicules légers

Les véhicules légers constituent la grande partie du trafic routier. Les informations importantes qui peuvent conduire à l'identification des VL sont : les dimensions de la carrosserie, le poids ainsi que la forme du châssis.

V.3.2.1.1 Dimensions et poids des véhicules légers

Nous nous sommes basés sur un recueil de données qui a touché 40 modèles de VL. Ces modèles représentent les meilleures ventes de véhicules légers (VL) des années 2008, 2009 et

CHAPITRE 1

2010. Les caractéristiques recherchées de ces véhicules sont obtenues d'après les données des constructeurs. Ce recueil nous a permis d'élaborer une gamme de VL circulant en France.

Le Tableau V.3 présente les caractéristiques limite de cette gamme.

	Longueur (mm)	Empattement (mm)	Largeur (mm)	Largeur extrémités pneus (mm)	Poids (kg)	% poids avant (kg)	% poids arrière (kg)	Garde au sol (mm)
Min	2500	1812	1750	1526	750	458	292	121
Max	4815	2815	2138	1767	2900	1450	1800	

Tableau V.3: Caractéristiques d'un échantillon de VL de taille 4554106 véhicules [22]

Les différentes données récupérées sont situées entre deux valeurs min et max. à titre d'exemple, le plus grand VL possède une longueur de 2,815 m tandis que le plus petit possède une longueur de 1,812 m.

L'empattement se définit comme étant la distance entre les essieux de véhicule.

Le poids minimum indiqué correspond au poids de véhicule avec tous les niveaux de liquide et en rajoutant le poids d'occupation du véhicule (75 kg × 1,2). Le 1,2 correspond au taux d'occupation moyenne.

Le poids maximum est fixé égale au PTAC du véhicule.

La garde au sol est mesurée en considérant un poids maximum de véhicule.

V.3.2.1.2 Différents types de châssis pour les véhicules légers

La deuxième caractéristique recherchée pour les véhicules de type VL est la forme du châssis. Ce dernier représente l'élément fondamental de véhicule qui entre en interaction avec le capteur enterré dans le sol. Il est fabriqué à base d'acier et il a évolué depuis sa première utilisation. Les différentes formes de châssis utilisées dans la construction des VL sont les suivantes :

a) Le châssis élémentaire

Deux poutrelles appelées "longerons", sont reliées par des traverses et renforcées par des croisillons ou des goussets. Encombrants, lourds et ne favorisant pas la position du centre de gravité, cette forme de châssis est utilisée pour des applications de véhicules de type poids lourds, mais abandonnés depuis longtemps pour des véhicules de tourisme classiques.

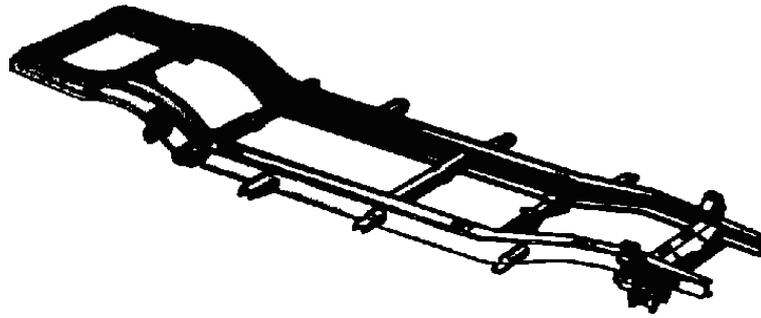


Figure V.2: châssis élémentaire [23]

b) Le châssis tubulaire

Les traverses, les longerons et le support de la structure sont en tubes. Ce système très léger est surtout utilisé pour des applications de voitures de course.



Figure V.3: Châssis tubulaire [24]

c) Le châssis plate-forme

Sa forme est proche de celle du châssis élémentaire dont lequel les longerons et les traverses sont recouverts d'une tôle d'acier. Le restant de la carrosserie est généralement vissé sur le châssis. Ce système fut abandonné lors de la disparition des 2CV Citroën et Renault 4.

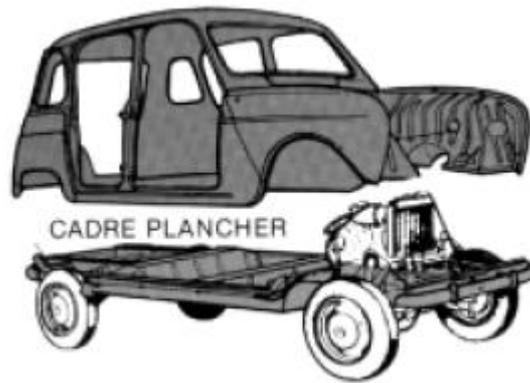


Figure V.4: Châssis plate-forme [25]

d) Le châssis poutre

Le châssis est principalement constitué d'une poutre centrale (tube). Il est complété par des éléments latéraux (soutien de la carrosserie) et des " fourches " AV et AR, supportant le groupe motopulseur ainsi que les trains roulants.

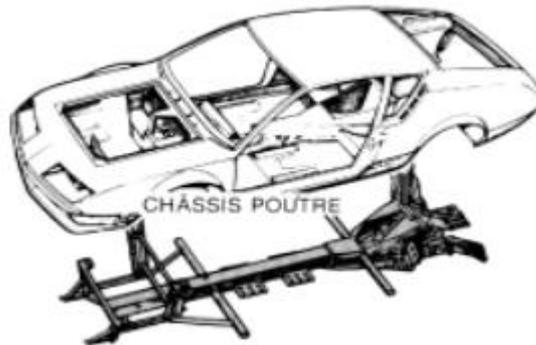


Figure V.5: Châssis poutre [26]

e) Le châssis coque

C'est un ensemble châssis et coque monobloc. Il est constitué d'éléments en tôle d'acier emboutis (0,6 à 1,5 mm), dont l'assemblage est réalisé par soudure électrique ou par point. Il dispose de renforts AV et AR pour supporter les organes mécaniques. Aujourd'hui, ce type de châssis est universellement exploité.



Figure V.6: Châssis coque [27]

f) Le châssis caisson

Un cadre ou "unit" reçoit les éléments mécaniques. Cet ensemble inférieur est fixé sur une coque classique par des liaisons élastiques (silentbloks). Cette technique particulière, utilisée sur les CX Citroën, apportent des améliorations en ce qui concerne :

- Le confort (filtration des vibrations).
- La sécurité secondaire : dissipation de l'énergie en cas de chocs Av ou AR

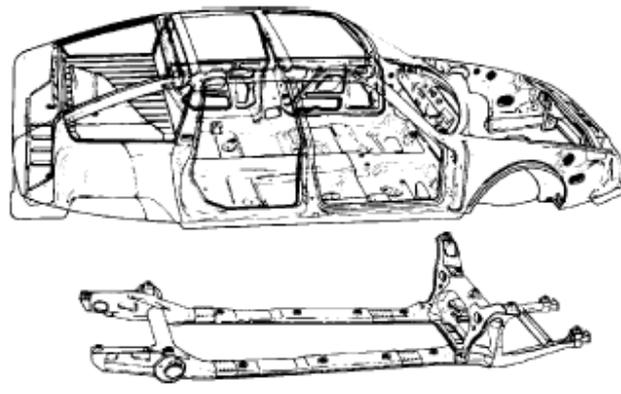


Figure V.7: Châssis caisson [28]

V.3.2.2 Caractéristiques des véhicules utilitaires

Les VU sont des véhicules qui ont une grande capacité de stockage. Leurs caractéristiques sont obtenues en analysant un échantillon de véhicules qui se compose de 10 modèles.

V.3.2.2.1 Dimensions des véhicules utilitaires

Le Tableau V.4 présente les limites minimale et maximale pour la gamme de véhicules de type VU.

CHAPITRE 1

	Longueur (mm)	Empattement (mm)	Largeur (mm)	Largeur extrémités pneus (mm)	Poids (kg)	% poids avant (kg)	% poids arrière (kg)	Garde au sol (mm)
min	5135	3122	2100	1774	1740	1148	592	181
max	5998	4035	2470	2050	3500	1850	2000	

Tableau V.4: Caractéristiques des VU [22]

Le poids à vide correspond au poids de véhicule avec tous les niveaux de liquide en ajoutant un poids de 75 kg qui correspond au poids du conducteur. Quand le véhicule est chargé, les constructeurs considèrent que le poids supplémentaire se répartisse de la façon suivante : 20 % sur l'essieu avant et 80 % sur l'essieu arrière. Cette répartition permet de calculer le poids maximum sur chaque essieu de véhicule. La garde au sol est mesurée pour un véhicule pleinement chargé [22].

V.3.2.2.2 La forme du châssis

Le châssis universellement exploité dans la construction des véhicules urbains a une forme coque similaire à celui des VL. Néanmoins, ces dimensions ainsi que son hauteur sont plus grande.

V.3.2.3 Caractéristiques des véhicules de types autobus et autocar

Les véhicules de types autobus ou autocar sont des moyens de transport qui peuvent accueillir plusieurs voyageurs. Ces véhicules disposent d'un châssis similaire au châssis des VL et d'un PTAC qui dépasse 3,5 tonnes. Quelques autobus (ou autocar) disposent de plus de deux essieux (voir Tableau V.5). Une autre remarque importante est que les autobus disposent d'une longueur importante qui peut atteindre 25 m et d'une hauteur de châssis aussi importante. Ces informations jugées importante caractérisent cette catégorie de véhicule et permettent à les discriminer des autres types de véhicules.

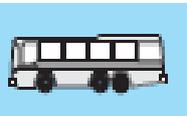
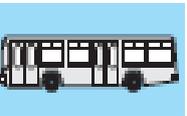
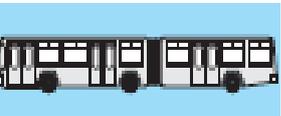
			
autobus ou autocar à 2 essieux	autobus ou autocar à 3 essieux	autobus ou autocar à 2 essieux largement séparé	autobus ou autocar à 3 essieux largement séparés

Tableau V.5: Différents types de VU

V.3.2.4 Caractéristiques des PL

Un poids lourd est un véhicule qui permet de transporter tous types de marchandises. Lorsque le véhicule ne se sépare pas de sa carrosserie on parle de véhicule isolé ou véhicule porteur. Dans le cas contraire, il s'agit d'un véhicule articulé. Nous présentons dans cette section les caractéristiques de quelques PL.

CHAPITRE 1

V.3.2.4.1 Dimensions des PL

La particularité des véhicules poids lourds, par opposition aux véhicules légers, consiste en une grande diversité de forme. La littérature montre bien que les PL ont un poids supérieur à 3,5 tonnes et une garde au sol supérieure à 30 cm.

Les différentes silhouettes répandues en France sont présentées dans le Tableau V.6. Les silhouettes de type tracteur-semi-remorque (types : 3, 4, 6 et 7) représentent environ 40 % du parc poids lourd français [29]. Ces véhicules ne circulent que rarement dans les milieux urbains et périurbains [30]. Les véhicules type 1 et 2 sont des véhicules de type "porteur".

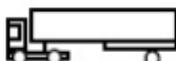
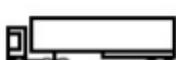
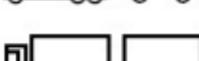
Types	Silhouettes	Poids moyen roulant (kg)	Poids des marchandises transportées (kg)	% de surcharges sur le poids total
1		8100	3200	1.2
2		16400	4400	5.2
3		14400	3000	9.5
4		22600	9400	2.2
5		22100	11600	2.1
6		30100	15800	16
7		29500	9900	13.6
8		30000	14800	10.7
9		31300	14900	18.3
10		32100	10100	26.8
11	Exceptionnels	34100	12100	37.8

Tableau V.6: Les poids des différents types des véhicules PL [31]

L'identification de ces véhicules peut se réaliser en se basant sur le nombre d'essieux ainsi que leurs poids. Cela se fait à l'aide du câble piézoélectrique.

V.3.2.4.2 La forme de la carrosserie

Le châssis d'un véhicule de type poids lourd s'approche du châssis de type élémentaire, deux éléments métalliques joignant l'avant de l'arrière du véhicule appelés longerons, tandis que les plus courts éléments, perpendiculaires aux longerons, sont appelés traverses (voir Figure V.8).

CHAPITRE 1

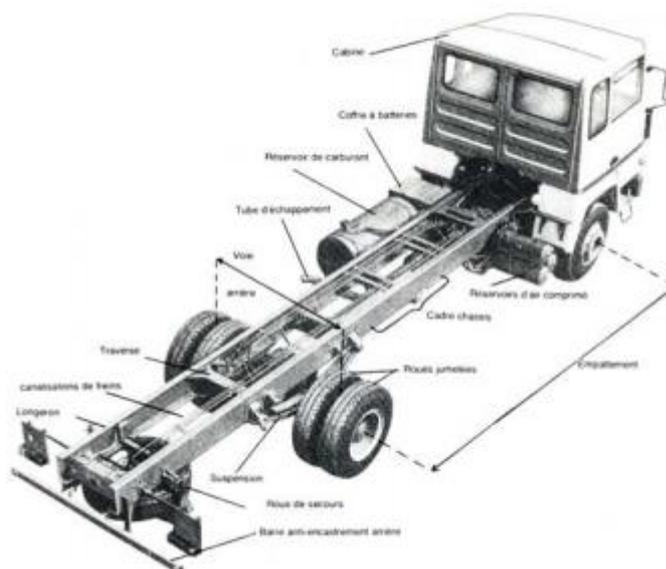


Figure V.8: Le châssis standard des véhicules PL

V.3.2.5 Caractéristiques des 2RM

Les 2RM sont des véhicules motorisés à deux roues. Les informations importantes qui peuvent conduire à l'identification de ces véhicules sont leurs dimensions ainsi que leurs poids. Les caractéristiques d'un échantillon qui englobe 41 modèles de cyclomoteurs et 60 modèles de motocyclettes ont été recherchées sur les sites des différents constructeurs. Cet échantillon représente les meilleures ventes de 2RM des années 2008, 2009 et 2010. Ce travail nous a permis d'élaborer une gamme de 2RM. Le Tableau V.7 et le Tableau V.8 présentent les valeurs limites de cette gamme.

	Longueur (mm)	Empattement (mm)	Largeur (mm)	Poids (kg)	% poids avant (kg)	% poids arrière (kg)	Garde au sol (mm)
Min	1800	1265	665	140	56	84	131
Max	2280	1595	900	419	168	251	

Tableau V.7: Caractéristiques d'un échantillon de cyclomoteurs de taille 190870 [22]

	Longueur (mm)	Empattement (mm)	Largeur (mm)	Poids (kg)	% poids avant (kg)	% poids arrière (kg)	Garde au sol (mm)
Min	1955	1270	620	133	58	75	151
Max	2635	1545	990	517	219	298	

Tableau V.8: Caractéristiques d'un échantillon de Motocyclette de taille 206906 [22]

CHAPITRE 1

Selon ces données, les poids indiqués sont les poids du véhicule à vide avec tous les niveaux de liquides. Il convient d'ajouter le poids du conducteur voir même le poids d'un passager supplémentaire. Le poids minimum estimé est égale à 50 kg et le poids maximum est estimé à 150 kg pour un cyclomoteur et 240 kg pour une motocyclette. D'après les données des constructeurs, le poids supplémentaire se répartit en moyenne de la façon suivante : 37 % sur la roue avant et 63% sur la roue arrière. La garde au sol indiquée correspond à celle obtenue avec un poids maximum [1].

V.3.3 Synthèse des travaux de recherche sur les véhicules

À partir du classement précédent et en fonction des objectifs souhaités, nous avons établi un classement de cinq catégories qui sont :

Catégorie 1 : elle concerne tous les véhicules légers, elle englobe la classe 1 et la classe 2. Le châssis le plus exploité pour ce type de véhicule est de forme coque.

Catégorie 2 : nous avons classé les VU dans cette catégorie. Ils sont caractérisés par un châssis de forme coque similaire à celui des VL, mais leurs dimensions sont plus grandes.

Catégorie 3 : les autobus et les autocars sont classés seuls dans la troisième catégorie.

Catégorie 4 : cette catégorie est dédiée aux PL. Ces derniers sont reconnus par leurs poids et par un châssis de grande hauteur.

Catégorie 5 : tous les 2RM sont classés dans la catégorie 4. Il n'ya aucune nécessité de différencier les cyclomoteurs des motocyclettes.

L'étude présentée montre que chaque type de véhicule possède des caractéristiques propres qui conduisent à son identification. Ces caractéristiques sont : le poids, le nombre d'essieux, la forme du châssis, les dimensions de véhicule, etc.

Pour les VL et VU, les informations qui peuvent conduire à leur identification sont leurs dimensions, la forme et la hauteur de leurs châssis, leurs poids ainsi que le nombre des essieux. Pour les PL, ce sont la hauteur du châssis, la longueur ainsi que le nombre des essieux. Finalement, l'information jugée importante pour les 2RM est le poids.

Il arrive que d'autres véhicules aient des caractéristiques différentes à celles présentées dans les tableaux (Tableau V.3, Tableau V.4, Tableau V.5, Tableau V.6, Tableau V.7 et Tableau V.8), cela sera pris en compte en établissant des intervalles avec prises des incertitudes.

V.4 Les techniques de détection et de suivi du trafic

Le contrôle du trafic et des usagers routiers est une discipline qui a évolué fortement dernièrement. Cette évolution est principalement liée à la multiplication du nombre des véhicules qui a engendré la multiplication du nombre des accidents. Les laboratoires de recherches ainsi que les industriels ont émergés le domaine de détection afin de proposer des méthodes ou des produits qui améliorent la sécurité des usagers ce qui devrait diminuer le nombre des accidents. Par conséquence, les produits développés ont comme mission générale le suivi du trafic. Plusieurs produits et techniques de détection existent, nous présenterons ci-dessous quelques techniques de détection. D'autres techniques existent mais nécessitent des travaux de développement et de recherche afin de les rendre plus précises et plus performantes. Notons aussi que les capacités de détection de telles techniques est le facteur principal qui a permis ou non le développement de celles-là. A titre d'exemple, un capteur qui

dispose d'un champ de détection large est plus intéressant aux chercheurs dans ce domaine qu'à celui qui se limite à une détection ponctuelle.

V.4.1 Les tubes pneumatiques

Un tube pneumatique est un tube en caoutchouc de forme cylindrique, dans la plupart du temps. Il est fixé sur la chaussée et soumis aux chocs des roues de véhicules traversant la chaussée. Les chocs causés par les roues engendrent un écrasement du tuyau, ce qui génère une pression qui se propage jusqu'au détecteur électronique. Une capsule sensible à la variation de la pression est connectée à l'extrémité du tuyau [32].

Contrairement à d'autres capteurs, les tubes pneumatiques ne nécessitent pas de travaux de génie civil, leur positionnement sur la route peut se faire par une personne non qualifiée. Par contre, ils présentent de nombreux inconvénients qui diminuent leur précision :

- Ils s'usent rapidement (8-15 jours) surtout en zone à forte accélération ou à forte décélération [32].
- Ils peuvent enregistrer de fausses détections lors de la présence des piétons au voisinage de leurs emplacements, ce qui nécessite de choisir un emplacement isolé des piétons.
- Le taux d'erreur de ce capteur est de 10 % pour la différenciation des VL/PL et de 15 % pour la vitesse [32].

La combinaison de plusieurs tubes peut amener à mesurer les vitesses des véhicules et la classification de quelques types de véhicules (ex ; VL et PL).

Nous concluons que les tubes pneumatiques peuvent être la solution optimale pour des applications de comptage à faible trafic, pendant une durée limitée, qui n'exigent pas une grande précision.

V.4.2 Les capteurs résistifs

Deux surfaces conductrices séparées se rapprochent par l'effet de la pression exercée par la présence d'un piéton ou d'un véhicule. Ce capteur caractérisé par une durée de vie insuffisante ne permet pas de mesurer le poids. Ce dispositif n'est pas une solution optimale pour des applications qui nécessitent une précision de mesure et qui résistent aux trafics à fort débit de véhicules. Il est utilisé sur quelques passages piétons pour adapter la durée du feu vert et rendre prioritaire, les piétons [33].

V.4.3 Les radars Doppler

Le radar est un émetteur-récepteur fonctionnant à base d'ondes électromagnétiques, placé au voisinage de la route dans un endroit approprié. Son principe de détection se base sur l'effet Doppler dont il compare la fréquence de l'onde émise et de l'onde réfléchi par le véhicule. Malgré les avantages qu'ils présentent, les radars ne permettent pas de distinguer la catégorie des véhicules détectés [33] [34]. Leur utilisation se limite à l'indication des excès de vitesse par les différents véhicules. Les radars peuvent être utilisés pour détecter des véhicules à l'approche des feux et pour le comptage de véhicules.

V.4.4 Les technologies Infrarouge

Les capteurs infrarouges ont été utilisés essentiellement, dans plusieurs applications de la vie quotidienne, pour la détection de présence de véhicule ou de piétons. On distingue deux techniques infrarouges :

La première technique dont le principe se base sur la chaleur émise par le véhicule ou le piéton lors de sa présence. Sa portée peut atteindre 100 m [33].

La deuxième technique, appelée infrarouge actif, fonctionne selon le principe émetteur/récepteur. Le signal émis est de nature infrarouge (longueur d'onde de 0,9 à 1 μm). Jusqu'à présent l'utilisation de la technique infrarouge est limitée à la détection de présence sans identification. L'exploitation de cette technique dans le domaine de détection routier nécessite le développement des méthodes de traitement des signaux infrarouges.

V.4.5 Les barrières photoélectriques

Ces barrières sont composées d'un émetteur et d'un récepteur de faisceaux. Elles sont situées de part et d'autre de la voie. La détection d'un véhicule se déclenche quand le faisceau se coupe. Ce type de capteur est utilisé dans les voies de péage, et pour le comptage de véhicules. Néanmoins, l'identification des véhicules n'est pas possible par des systèmes qui se basent sur le principe émetteur/récepteur.

V.4.6 Le capteur Ultrason

Ce capteur met en œuvre un émetteur et un récepteur placés au-dessus de la chaussée. L'émetteur envoie périodiquement un signal qui sera réfléchi soit par la chaussée en cas d'absence de véhicule, ou par le véhicule en cas de présence de celui-ci. Selon la hauteur du véhicule, le temps de parcours peut être petit ou grand. Ce capteur, beaucoup utilisé au Japon, peut mesurer le débit, le taux d'occupation et aussi la vitesse avec une précision modeste. Les conditions météorologiques influent énormément sur le bon fonctionnement de ce capteur.

V.4.7 Les fibres optiques

Une onde électromagnétique se propage le long d'une fibre optique, selon un mode donné. Quand cette dernière subit une déformation, le mode de propagation change. Le système de détection est complété par un circuit électrique afin d'indiquer le passage des véhicules. Nous pouvons, par exemple, utiliser des LED sur les deux extrémités pour suivre la déformation du signal. Il apparaît bien que ce capteur présente plusieurs avantages. Il peut être utilisé en comptage de véhicules, identification et mesure de vitesse. Ces avantages le permettent de concurrencer le câble piézoélectrique si sa rigidité augmente et son prix diminue.

V.4.8 Télémètre laser à balayage (Cete NC)

Le télémètre est un appareil électronique qui dispose d'une source laser associée à un amplificateur optique, appelée résonateur, et d'un récepteur de signal. L'appareil est installé en hauteur face au trafic. Le télémètre muni d'un système rotatif à balayage, émet un faisceau laser de fréquence modulée qui sera projeté sur la surface des véhicules qui passent dans son champ d'action, ce dernier renvoie à son tour le faisceau laser. La détection et la classification des véhicules se font par traitement du signal émis et reconstitué, en tenant compte du temps mis par le faisceau et l'emplacement de l'appareil [35] [36].

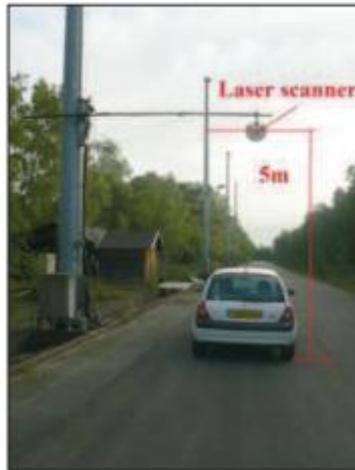


Figure V.9: Télémètre laser (Cete NC) [35]

Ce capteur est connu par sa précision et sa portabilité. En plus, il recouvre une large zone de détection, ce qui augmente le nombre de véhicule détectés. Il est aussi facile à installer, donc à entretenir. La détection par ce type de capteur est assurée le jour comme la nuit, ce qui est un avantage par rapport à d'autres techniques de détection.

Malgré ces avantages, la technologie scanner laser n'est pas beaucoup explorée indépendamment pour détecter et compter les véhicules sur les routes urbaines ou sur autoroutes. En effet, la lenteur du balayage limite son utilisation sur les trafics ralentis, ce qui justifie son existence sur les péages automatiques où la vitesse des véhicules n'est pas élevée. Dans la plupart du temps, un scanner laser est couplé avec une caméra (ou un autre scanner laser) et le système est installé sur chaque voie de circulation, ce qui rend l'ensemble très cher.

Les conditions météorologiques constituent un autre obstacle qui limite l'utilisation d'un tel capteur. En effet, des problèmes dus à la réfraction du signal émis, par la neige ou le brouillard, peut erroné la détection. Également, le signal réfléchi des corps foncés n'est pas suffisant. D'autres obstacles peuvent engendrer la réfraction du signal émis, existant, comme le pare-brise. Notons aussi, la nécessité d'un nettoyage régulier de sa lentille.

V.4.9 Capteurs vidéo (Néavia, Ifsttar, Litis)

Ce capteur est constitué d'une ou plusieurs caméras, généralement adaptées à des applications de poursuites, installées en hauteur face au trafic. Dans quelques situations, le capteur est raccordé à une centrale d'acquisition et de traitement en temps réel des données de trafic. Le suivi du trafic se fait par le traitement et l'analyse des images enregistrées par la caméra. Pour un fonctionnement la nuit, le système est renforcé par un éclairage infrarouge pour assurer la visibilité. Actuellement, les recherches dans ce domaine ont tendance à améliorer les algorithmes de traitement des images [36].



Figure V.10: Capteurs vidéo : a) mono-caméra (Néavia), b) stéréoscopique (Ifsttar)

On trouve dans le marché, deux principaux capteurs d'analyse d'image destinés à la détection automatique d'incidents et la mesure du trafic

Les facteurs majeurs qui s'opposent à l'exploitation de ce capteur, sont les conditions météorologiques (pluie, neige, brouillard, ombre, etc.) qui influent énormément sur sa précision de détection. Un autre inconvénient à citer est son prix élevé. Comme le capteur télémètre laser, le capteur vidéo nécessite un nettoyage régulier de sa lentille. Le capteur vidéo peut être soumis de temps en temps, à des vibrations qui modifient son champ de détection [37]. Par conséquent, le choix du lieu d'installation peut être un problème majeur.

V.4.10 Magnétomètres (Cete Ouest, CEA)

Les magnétomètres sont des capteurs autonomes miniatures (quelques centimètres) enfouis dans la chaussée. Ils mesurent la déformation du champ magnétique terrestre au passage des véhicules et transmettent leur signature magnétique afin de les compter, classifier et estimer leur vitesse [38].



Figure V.11: Magnétomètres (Cete Ouest, CEA)

Le principal inconvénient de ce capteur est sa sensibilité très élevée à tout corps métallique, ce qui oblige un environnement approprié (on ne peut pas l'installer devant un

pont métallique). Ce genre de capteur est connu par sa faible précision et par sa dépendance à la température.

V.4.11 Les boucles électromagnétiques

Une boucle électromagnétique enterrée dans la chaussée à une distance donnée, alimentée par un courant électrique, génère un champ magnétique. Ce champ est perturbé lors de la traversée des véhicules. Notons que cette perturbation diffère d'un véhicule à un autre. Le type de véhicule, sa vitesse et son temps de présence peuvent être mesurés par ce capteur. Néanmoins, la maîtrise des différentes formes de perturbation, qui conduit à l'identification de véhicule, nécessite une étude approfondie des caractéristiques magnétiques des différentes formes de boucle.

V.4.12 Les câbles piézoélectriques

Le câble piézoélectrique est constitué essentiellement d'un matériau piézoélectrique. Quand une roue traverse le câble, cela engendre une tension électrique sur les deux électrodes électriques placées sur la face supérieure et inférieure du câble. Cette tension dépend surtout du poids de la roue.

V.4.13 Synthèse des travaux sur les techniques de détection

Actuellement, les chercheurs ainsi que les industriels ont tendance à combiner différents types de capteurs pour exploiter les avantages de chacun des capteurs. D'où l'idée de combiner des boucles électromagnétiques avec des câbles piézoélectriques pour former un système de détection fiable [39].

L'étude menée montre que ce capteur présente des avantages importants en termes de qualité et quantité de détection, coût, résistivité, indépendance des conditions météorologiques, etc.

Les trois autres technologies choisies dans le projet METRAMOTO ont été développées de manière parallèle par les partenaires. Le télémètre laser à balayage par CETE NC et LITIS, le capteur vidéo par NÉAVIA, IFSTTAR et LITIS, le magnétomètre par CETE OUEST et LETI.

L'effort significatif sur ces quatre technologies a mené à quatre thèses de doctorat, une thèse par technologie.

V.5 Principaux types de boucles électromagnétiques

La littérature propose plusieurs formes de boucles électromagnétiques allant de la plus simple à la plus complexe. Cette richesse est la conséquence du besoin de détecter différents types de véhicules dans différentes configurations de routes. Pour cela, les constructeurs de boucles ont joué sur plusieurs facteurs afin de régler la sensibilité de la boucle à une valeur convenable pouvant produire un champ magnétique couvrant la voie sans interférer avec les voies adjacentes. Parmi ces facteurs nous pouvons citer:

- La géométrie de la boucle (rectangulaire, circulaire, parallélogramme etc.).
- Le nombre de spires de la boucle.
- Les dimensions de la boucle.
- L'angle d'inclinaison de la boucle sur la chaussée. En effet, nous pouvons augmenter la valeur de l'inductance mutuelle entre le véhicule et la boucle et donc

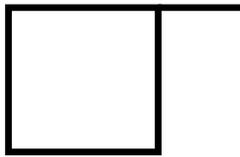
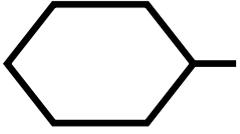
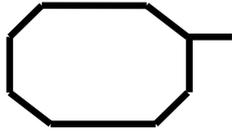
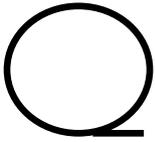
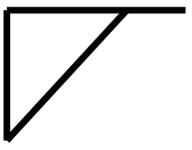
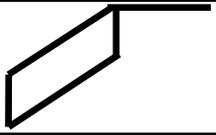
la valeur de la sensibilité si on augmente la surface qui s'oppose au flux magnétique généré par la boucle électromagnétique. Cette technique est surtout utilisée dans la détection des véhicules de petit gabarit).

- L'association de plusieurs boucles de telle sorte qu'elles couvrent toute la voie par le champ magnétique.
- Le sens du courant. En effet, les champs mutuels peuvent être additifs ou soustractifs selon que le courant ait dans un sens ou dans un autre.

V.5.1 Boucles électromagnétiques existantes

Nous présentons dans le Tableau V.9 les différentes formes de boucles électromagnétiques proposées dans la littérature [33] [40] [41] [42] :

CHAPITRE 1

Type de boucle	Descriptions
	La boucle électromagnétique rectangulaire très connue dans le domaine de détection. Les performances de cette boucle dépendent de ses dimensions et du nombre de spires.
	La boucle électromagnétique carrée dispose des mêmes paramètres de réglages que la boucle rectangulaire.
	Cette boucle électromagnétique est de forme hexagonale . Elle dispose de deux segments horizontaux et de quatre segments inclinés par rapport au sens de circulation. Cette inclinaison renforce la détection des petits objets.
	Cette boucle électromagnétique est de forme octogonale . 4 segments sont inclinés, 2 sont verticaux et 2 horizontaux.
	La boucle circulaire dispose d'une distribution de champs particulière.
	Cette boucle électromagnétique est de forme trapézoïdale . Elle a deux segments inclinés et deux autres horizontaux.
	Cette boucle est de forme triangulaire . Elle est caractérisée par un segment vertical, un horizontal et un autre incliné.
	Cette boucle a la forme d'un parallélogramme . Elle est inclinée par rapport au sens de circulation.

CHAPITRE 1

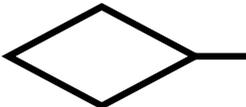
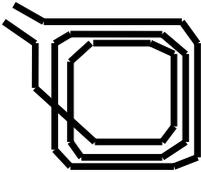
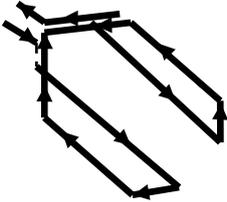
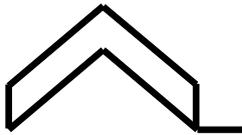
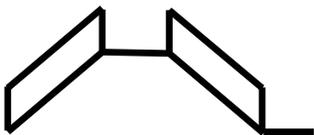
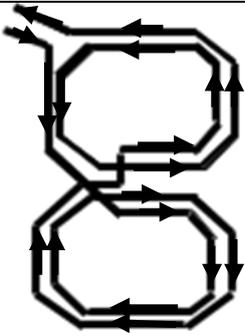
	<p>Cette boucle électromagnétique a la forme d'un parallélogramme. Elle est utilisée dans la détection des deux roues.</p>
	<p>Cette boucle électromagnétique de forme carrée est caractérisée par son nombre de spires différent de 1.</p>
	<p>Cette boucle électromagnétique de forme hexagonale est caractérisée par l'ajout de deux segments inclinés. Le sens du courant dans chaque segment est à étudier.</p>
	<p>Cette boucle électromagnétique est issue de l'association de deux boucles parallélogrammes.</p>
	<p>Dans cette boucle, deux parallélogrammes sont raccordés via un segment vertical. Le choix du sens de courant dans les segments n'est pas aléatoire.</p>
	<p>Cette boucle est le résultat du raccordement de deux boucles rectangulaires. L'autre facteur à prendre en considération est le sens du courant dans chaque segment.</p>
	<p>Boucle composée de deux boucles octogonales. Le nombre de spires est différent de 1. Le choix du sens de courant est important.</p>

Tableau V.9: Différentes formes de boucles électromagnétiques

V.5.2 Caractéristiques de quelques boucles électromagnétiques

Nous présentons dans ce paragraphe les caractéristiques de quelques boucles électromagnétiques exploitées dans le marché.

a) Boucle en forme de chevron

La boucle en chevron est constituée d'un ou de plusieurs parallélogrammes reliés ou non de telle sorte qu'elle recouvre la totalité de la voie par le champ magnétique. Les sections adjacentes de la boucle sont enroulées alternativement dans le sens horaire et antihoraire afin que les courants dans les extrémités adjacentes soient toujours dans le même sens. Le sens d'enroulement des différentes sections a été choisi de façon à rendre les flux mutuels additifs. L'alignement de la surface du parallélogramme permet d'augmenter la surface en interaction avec le véhicule.

La Figure V.12 présente une boucle magnétique de forme chevron avec les différentes dimensions.

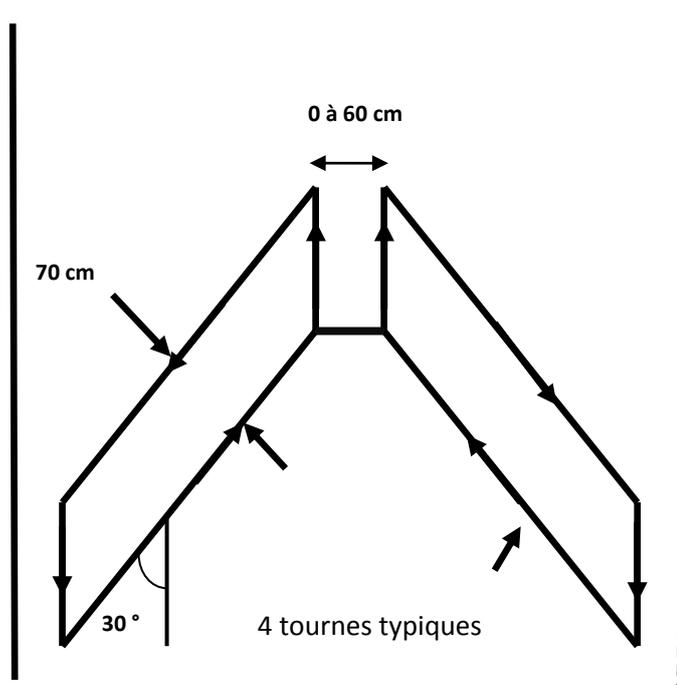


Figure V.12: Boucle électromagnétique en forme chevron

b) Boucle magnétique en forme de palmier

C'est une boucle en forme de palmier qui s'inscrit dans un carré de 1,8 m. La boucle comporte 3 spires lorsqu'elle est reliée seule au détecteur et 5 spires lorsqu'elle est reliée avec une autre boucle de 3 spires. Cette boucle peut être utilisée soit dans des applications de détection des véhicules ou des vélos.

La Figure V.13 présente une boucle magnétique en forme de palmier

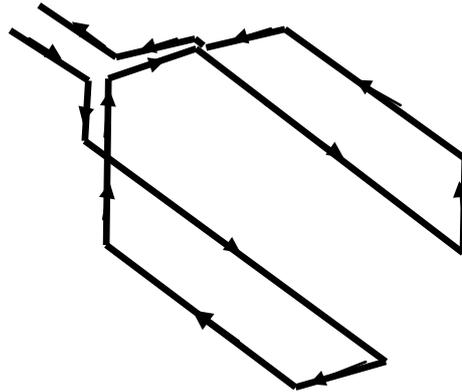


Figure V.13: Boucle électromagnétique en forme de palmier

Si la largeur de la voie est grande, la configuration présentée par la Figure V.14 est plus répandue.

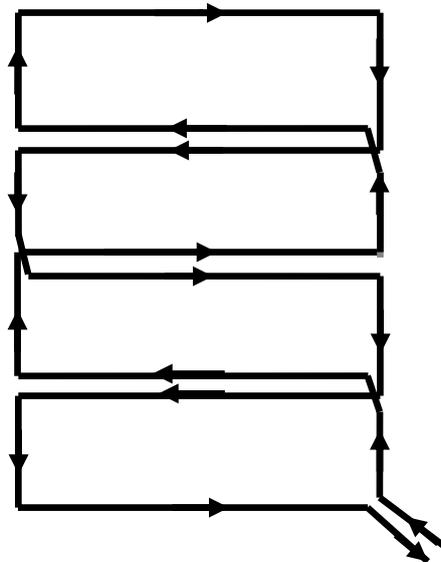


Figure V.14: Boucle électromagnétique en forme de palmier-rectangulaire

c) Boucle avec tête

La boucle électromagnétique avec tête est surtout utilisée pour détecter les deux roues. Elle existe en deux configurations comme présentée dans les Figure V.15 et Figure V.16.

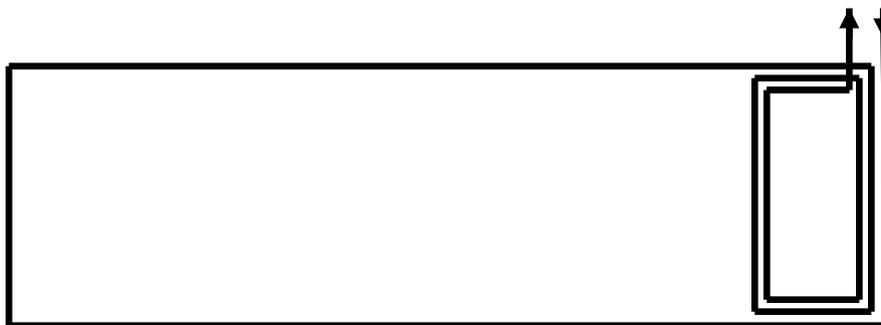


Figure V.15: Boucle électromagnétique rectangulaire avec tête

La deuxième configuration est caractérisée par l'inclinaison de ces segments ce qui augmente l'efficacité de détection.

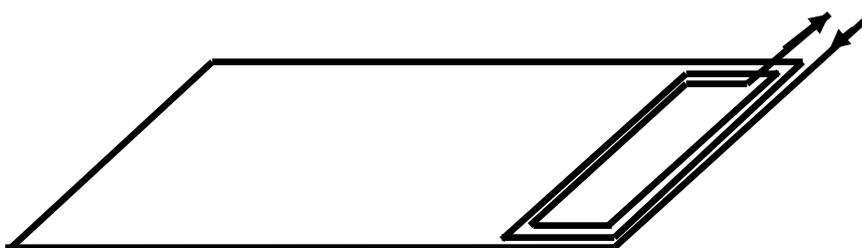


Figure V.16: Boucle électromagnétique parallélogramme avec tête

d) Boucle en forme de quadripôle

La configuration « boucle quadripôle » a été d'abord utilisée dans les années 1970. Cette configuration caractérisée par un trait de scie longitudinal ajouté au centre de la voie. Les boucles sont câblées en une forme de huit de telle sorte que les courants traversant les fils adjacents sont dans le même sens, ce qui augmente la densité du champ magnétique au milieu de la voie. Au contraire, si les courants traversant les fils adjacents sont en sens opposé cela risque à créer des régions pauvres du champ.

Cette boucle existe en deux configurations :

- Configuration 1-2-1 :

La configuration mono-fil avec un fil sur les frontières et deux fils au centre est utilisée pour la détection des automobiles, camions et les grandes motos.

- Configuration 2-4-2

La configuration 2-4-2 est recommandée pour la détection de petites motocyclettes et bicyclettes.

Le champ magnétique créé par cette boucle est concentré autour des fils. Donc, pour une meilleure détection, l'emplacement de la boucle doit être choisi de telle sorte que le cycliste roule suffisamment proche des fils de quadripôle.

La Figure VI.17 présente une boucle en forme de quadripôle.

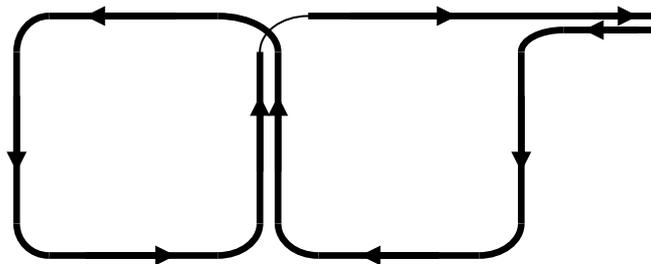


Figure V.17: Boucle électromagnétique en forme de quadripôle

V.5.3 Synthèse des travaux sur les boucles

L'étude bibliographique menée sur les boucles électromagnétiques a conduit à identifier les caractéristiques de plusieurs boucles qui peuvent répondre à notre cahier des charges.

Rappelons qu'en France la boucle la plus connue est la boucle SIREDO de forme rectangulaire. Les boucles susceptibles d'intéresser notre étude seront étudiées ultérieurement et une étude comparative devra nous permettre de choisir la boucle la mieux adaptée pour la réalisation du capteur hybride.

VI. CHAPITRE 2

Approches de la modélisation analytique et numérique tridimensionnelle du système composé de boucles électromagnétiques et de véhicules. Dimensionnement d'un capteur magnétique

Résumé :

Nous présentons dans ce chapitre une approche de la modélisation analytique et numérique du système composé de véhicules et des boucles électromagnétiques enterrées dans le sol. Cette étude consiste à modéliser les différentes interactions qui auront lieu entre les boucles elles-mêmes, et entre les véhicules et les boucles.

VI.1 Introduction

La conception d'un système de détection fiable passe par la connaissance des caractéristiques magnétiques des boucles. L'objectif de ce chapitre est d'étudier différentes formes de boucles électromagnétiques pour une meilleure connaissance des caractéristiques magnétiques de chaque boucle. Parmi les boucles étudiées figure la boucle rectangulaire qui est très utilisée dans les systèmes actuels de détection. Les boucles de forme circulaire seront également étudiées. L'étude consiste à développer pour chacune des boucles des modèles analytiques tridimensionnels basés sur la loi de Biot et Savart. Les modèles ainsi développés permettront de définir les caractéristiques magnétiques, en absence et en présence des véhicules, de chacune des boucles pour une meilleure utilisation.

Les modèles analytiques seront ensuite validés par une étude numérique en 3D utilisant le logiciel de calcul de champs aux éléments finis FLUX3D.

Les résultats de cette étude, nous permettront de déterminer la forme ainsi que les dimensions de la boucle pouvant être utilisée pour la réalisation du nouveau système hybride de détection des deux roues motorisées.

Il faut souligner que le dimensionnement du capteur magnétique fait appel aux caractéristiques des routes et des véhicules présentées dans le premier chapitre.

VI.2 Présentation du système étudié

Le système étudié englobe une ou plusieurs boucles adjacentes enterrées dans le sol, ainsi qu'un ou plusieurs véhicules traversant les boucles électromagnétiques.

VI.2.1 Les boucles électromagnétiques

Nous avons choisi d'étudier deux formes de boucles : la boucle de forme rectangulaire et la boucle de forme circulaire.

L'étude bibliographique présentée dans le premier chapitre montre bien que la boucle de forme rectangulaire est plus utilisée dans la détection des VL, VU et PL. La stratégie adoptée dans cette étude, qui consiste à ne pas détecter les 2RM par les boucles, favorise le choix de cette boucle.

La deuxième boucle choisie est de forme circulaire. Cette boucle présente des caractéristiques différentes de celles de la boucle rectangulaire. L'étude de cette boucle de forme particulière peut nous ouvrir de nouvelles opportunités. Citons, à titre d'exemple, le remplacement du câble piézoélectrique, de coût élevé, par des boucles circulaires.

Il faut souligner que l'enterrement des boucles de forme circulaire exige un matériel spécial pour l'installation, ce qui n'est pas le cas pour les boucles rectangulaires.

VI.2.2 Le véhicule

Le véhicule se compose de plusieurs éléments dont le châssis. Ce dernier, qui représente le bas de la carrosserie (voir Figure VI.1), se caractérise par une épaisseur qui varie d'un constructeur à un autre. Les données récupérées de plusieurs constructeurs automobiles montrent que la valeur de l'épaisseur du châssis se situe entre 0,6 mm et 1 mm.

Dans cette étude, le châssis est considéré comme l'élément principal du véhicule qui interagit avec les boucles enterrées dans le sol. Il est construit à base d'un matériau ferromagnétique qui est l'acier. Quand un véhicule traverse une boucle électromagnétique, le

CHAPITRE 2

châssis est en position horizontale par rapport au plan des boucles. Cette position relative rend son influence sur les boucles plus dominante par rapport à l'influence des autres parties de la carrosserie.

Le châssis de type coque, universellement utilisé, se compose de trois parties : la partie centrale et les deux côtés. La forme du châssis montre l'existence d'une dénivellation entre sa partie centrale et ses deux cotés (voir Figure VI.1). Cette dénivellation rend l'influence des deux côtés du châssis négligeable comparée à la partie centrale.

Mis à part le châssis, le reste des éléments constituant la carrosserie ne sont pas pris en considération. Cela se justifie par les arguments suivants :

- la nature des matériaux utilisés dans la construction de plusieurs éléments de véhicule (exception faite pour le châssis), qui ne sont pas ferromagnétique. Cela signifie que le champ magnétique crée n'est pas influencé par ces éléments
- la position verticale des roues par rapport aux boucles électromagnétiques diminue leur influence sur le champ magnétique généré par la boucle électromagnétique
- les parties latérales de la carrosserie se situent verticalement par rapport aux boucles. Ce qui minimise leur influence
- l'épaisseur de la carrosserie ne favorise pas la canalisation des lignes du champ
- la distance importante entre quelques éléments constituant la carrosserie et les boucles électromagnétiques réduit leur influence sur le champ magnétique

Après avoir justifié la domination de l'influence du châssis par rapport à l'influence des autres éléments constituant le véhicule, nous étudierons dans la suite de ce chapitre les différentes interactions existantes entre les boucles elles-mêmes et entre les boucles et les châssis des véhicules.

Nous devons tout d'abord connaître les caractéristiques à vide des différentes boucles enterrées dans le sol. Une fois ces caractéristiques sont déterminées, nous passerons à étudier les interactions entre les différents éléments du système, notamment entre les boucles adjacentes, et entre les boucles et les véhicules circulants. Suite à ces interactions, les caractéristiques magnétiques des boucles changent, ce qui fait varier les paramètres électroniques du détecteur électronique (conditionneur) relié aux différentes boucles électromagnétiques (voir annexe) [38] [33].

La Figure VI.1 montre la partie centrale du châssis qui sera prise en compte dans les modèles d'analyse des différentes interactions.



Figure VI.1: Partie du châssis considérée dans l'étude

VI.3 Modélisation analytique et numérique du système composé de boucles électromagnétiques et de véhicules

Nous présentons dans cette partie les différents modèles analytiques et numériques qui décrivent les caractéristiques des boucles électromagnétiques enterrées dans le sol, ainsi que les outils analytiques nécessaires à l'étude des interactions qui auront lieu entre les éléments constituant le système étudié. La totalité de ces modèles constituent un simulateur du système boucles-véhicules.

VI.3.1 Nature du problème étudié

Dans les sections VI.3.2 et VI.3.3 nous allons introduire le vecteur potentiel magnétique \vec{A} pour déterminer l'induction magnétique B statique créée à partir d'un courant continu. Or dans le cas réel le courant traversant la boucle électromagnétique est de fréquence f . Dans ce cas le vecteur potentiel magnétique \vec{A} se dérive d'un courant variant dans le temps. Donc, son expression se calcule depuis un courant variant dans le temps.

L'objectif principal de cette démarche consiste à démontrer que les équations qui seront développées à partir de l'expression statique du champ magnétique sont des approximations valables à cette problématique étudiée. Cela est valable pour le cas des modèles numériques et analytiques.

Afin de démontrer la faisabilité de cette hypothèse, nous considérons une portion de fil traversé par un courant variant dans le temps, comme indiqué sur la Figure VI.2. En un point M de l'espace, ce courant crée une induction magnétique B qui dérive de l'expression du vecteur potentiel magnétique \vec{A} .

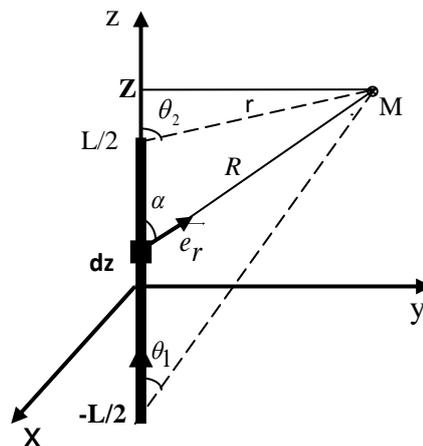


Figure VI.2: Induction magnétique créée à partir d'une portion de fil

L'expression du vecteur potentiel magnétique A pour un courant variable dans le temps, est donnée comme suit :

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_v \frac{J(t - \frac{R}{v})}{R} dv \quad (VI.1)$$

CHAPITRE 2

Sachant que :

$v = \frac{1}{\sqrt{\mu\xi}}$: correspond à la vitesse de propagation de l'onde électromagnétique.

$J(t)$: est la densité du courant.

V : est le volume qui englobe le courant.

R : est la distance directe entre l'élément Jdv et le point M

Les phénomènes étudiés sont considérés harmoniques. Par conséquent, l'expression du vecteur potentiel magnétique A devient :

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{\widehat{J} e^{-\beta R}}{R} dv \quad (\text{VI.2})$$

Avec :

\widehat{J} : le module de la densité de courant.

$\beta = \frac{\omega}{v} = \frac{2\pi}{\lambda}$: une constante qui dépend de la fréquence du courant.

Où λ est la longueur d'onde, définie par :

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{1}{\sqrt{\mu\xi} f}$$

Le Tableau VI.1 représente les valeurs de λ en pour plusieurs valeurs de fréquence

f (hz)	50	1000	10 000	50 000	90 000
λ (m)	5995849,163	299796,879	29979,6879	5995,93758	3331,07643

Tableau VI.1: Variation de λ en fonction de la fréquence du courant

Le développement limité de la fonction $e^{-\beta R}$ autour de 0 donne :

$$e^{-\beta R} = 1 - j\beta R + \frac{\beta^2 R^2}{2} + \dots$$

Sachant que $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$, le DL de $(e^{-\beta R})$ devient :

$$e^{-\beta R} = 1 - j2\pi \frac{R}{\lambda} + \frac{(2\pi)^2}{2} \left(\frac{R}{\lambda}\right)^2 + \dots$$

En considérant une largeur maximale de la voie de 3,5 m et en limitant le domaine d'étude autour de la boucle électromagnétique, nous remarquons que R est négligeable devant λ . Cela implique que les rapports les termes $2\pi \frac{R}{\lambda}$, $\frac{(2\pi)^2}{2} \left(\frac{R}{\lambda}\right)^2 \dots$ tendent vers 0. Par conséquent, l'expression de $e^{-\beta R}$ quand $R \ll \lambda$ est approximée à l'unité.

CHAPITRE 2

Le vecteur potentiel magnétique \vec{A} pour un courant variant dans le temps peut être approximé, dans ce cas, au vecteur potentiel pour un courant constant de fréquence nul. D'où :

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{J}{R} dv \quad (\text{VI.3})$$

En tenant compte de l'hypothèse précédente, le courant sera considéré constant. Il se répartit uniformément sur la surface latérale du conducteur dont dl représente son contour. Ainsi, l'expression du vecteur potentiel magnétique se résume à :

$$A = \frac{\mu I}{4\pi} \int_l \frac{dl}{R} \quad (\text{VI.4})$$

Et l'expression de l'induction magnétique se calcule comme suit :

$$\vec{B} = \text{rot} \vec{A} \quad (\text{VI.5})$$

VI.3.2 Approche de la modélisation numérique sous FLUX3D

Le système étudié est construit puis simulé en utilisant le logiciel FLUX3D. Il s'agit d'un logiciel pour la simulation aux éléments finis des systèmes électromagnétique. Il assure la conception et l'analyse de tout dispositif électromagnétique. Le simulateur de système est conçu sur FLUX3D. Il faut en premier lieu saisir la géométrie, puis définir les matériaux utilisés et leurs dimensions et enfin configurer les paramètres de simulation (l'espace de calcul et le choix du maillage adéquat). On peut ensuite lancer la résolution du problème [43].

La partie centrale du châssis est assimilée à une plaque métallique de faible épaisseur (les voitures construites par Peugeot disposent d'un châssis d'épaisseur égale à 0,8 mm ; donnée constructeur), dont la largeur est égale à la largeur du châssis et dont la longueur est égale à la longueur de la partie centrale du châssis, situé à une hauteur H du sol, comme indiqué sur la Figure VI.1. Le matériau utilisé possède une perméabilité magnétique de valeur μ_r .

La Figure VI.3 présente une structure conçue sous Flux3D avec une plaque métallique située au-dessus d'une boucle électromagnétique. Le dégradé de couleur représente l'induction magnétique induit dans la plaque.

La boucle électromagnétique, alimentée par un courant continu et génère un champ magnétique qui subit une perturbation considérable par la plaque. Cette perturbation modifie la valeur de l'inductance propre de la boucle électromagnétique.

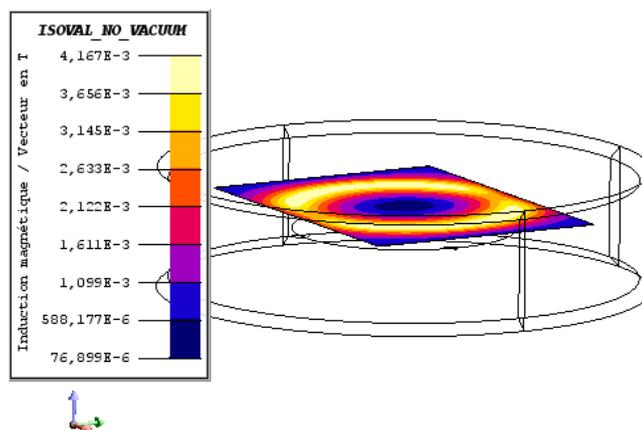


Figure VI.3: Un simulateur numérique sous Flux3D : Boucle circulaire/châssis

Le domaine d'étude est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées en un ensemble de points qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point sont appliquées les équations de Maxwell pour calculer un potentiel.

Une simulation précise nécessite un bon choix du nombre de nœud et d'éléments. Dans cette étude le maillage des différents éléments est choisi égal au maillage qui permet de trouver avec répétition une valeur connue dans la littérature. Dans notre cas, c'est la valeur de l'inductance propre de la boucle, calculée à vide. Une simulation réaliste exige généralement un temps de résolution important par comparaison aux modèles analytiques.

VI.3.3 Approche de la modélisation analytique

L'objectif est de développer un simulateur équivalent pouvant remplacer le système réel et permettant de se passer de la simulation numérique sous Flux3D caractérisée par un temps de simulation assez long et dont la gestion de l'environnement est assez complexe. A l'aide de ce simulateur équivalent nous pourrions dimensionner le capteur magnétique approprié.

VI.3.3.1 Modèles développés pour le système 1 : cas des boucles de forme rectangulaire

Le système 1 englobe des boucles électromagnétiques de forme rectangulaire, enterrées dans le sol, et un ou plusieurs véhicules traversant les boucles électromagnétiques. Les différents modèles dérivants le système 1 sont les suivants :

VI.3.3.1.1 Modèle de calcul de l'inductance propre d'une boucle rectangulaire

Le premier modèle développé concerne le calcul de l'inductance propre d'une boucle de forme rectangulaire de longueur L et de largeur l , comme présenté sur la Figure VI.4.

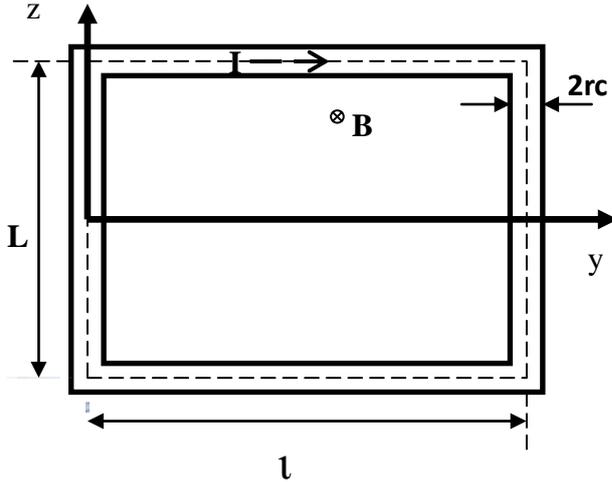


Figure VI.4: Boucle électromagnétique rectangulaire

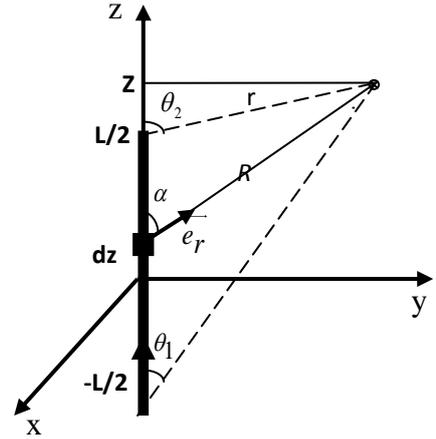


Figure VI.5: Portion de fil

Nous supposons que le courant I est réparti uniformément sur toute la section transversale du conducteur de rayon r_c [44] [42] (voir Figure VI.4).

Selon la loi de Biot et Savart [45] [44], l'induction magnétique créée à une distance R d'un élément de courant $I dl$ (voir Figure VI.4) est donnée par :

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \otimes \vec{R}}{R^3} \quad (\text{VI.6})$$

Considérons α l'angle entre l'élément du courant $I d\vec{l}$ et \vec{R} , d'où l'expression (VI.6) devient:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times \sin \alpha}{R^2} \quad (\text{VI.7})$$

On définit :

$$\alpha = (I d\vec{l}, \vec{r})$$

$$\sin \alpha = \frac{r}{R}$$

$$R = \sqrt{r^2 + (Z - z)^2}$$

En intégrant l'expression (VI.7), on aura:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[\frac{Z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z + \frac{L}{2})^2 + r^2}} - \frac{Z - \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z - \frac{L}{2})^2 + r^2}} \right] \vec{e}_\Phi \quad (\text{VI.8})$$

Avec $\vec{e}_\Phi = \vec{e}_z \otimes \vec{e}_r$

CHAPITRE 2

Le flux traversant la section de la boucle se calcule par la relation (VI.9) :

$$\Psi_{loop} = 2 \int_{rc}^{l-rc} \int_{\frac{-L}{2}+rc}^{\frac{L}{2}-rc} B(r, Z) dr dZ + 2 \int_{rc-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}-rc} \int_{rc}^{L-rc} B(r, Z) dr dZ \quad (VI.9)$$

Avec :

$$\Psi_{loop} = LI$$

En intégrant la relation (VI.9), nous obtenons la relation du flux suivante :

$$\Psi_{loop} = 2 \frac{\mu_0 I}{4\pi} (I_{11} - I_{12} + I_{21} - I_{22}) \quad (VI.10)$$

Et par conséquent l'expression de l'inductance propre de la boucle sous la forme suivante :

$$L_{loop} = \frac{\mu_0}{2\pi} (I_{11} - I_{12} + I_{21} - I_{22}) \quad (VI.11)$$

Tel que :

$$I_{11} = \int_{rc}^{l-rc} \int_{\frac{-L}{2}+rc}^{\frac{L}{2}-rc} 2 \frac{Z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z + \frac{L}{2})^2 + y^2}} dy dZ$$

$$I_{12} = \int_{rc}^{l-rc} \int_{\frac{-L}{2}+rc}^{\frac{L}{2}-rc} \frac{Z - \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z - \frac{L}{2})^2 + y^2}} dy dZ$$

$$I_{21} = \int_{rc-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}-rc} \int_{rc}^{L-rc} \frac{Z + \frac{l}{2}}{\sqrt{(Z + \frac{l}{2})^2 + y^2}} dy dZ$$

$$I_{22} = \int_{rc-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}-rc} \int_{rc}^{L-rc} \frac{Z - \frac{l}{2}}{\sqrt{(Z - \frac{l}{2})^2 + y^2}} dy dZ$$

Le Tableau VI.2 présente les valeurs de l'inductance propre de plusieurs boucles électromagnétiques de forme rectangulaire.

CHAPITRE 2

$l(m) \backslash L(m)$	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2
1	4.40	4.92	5.43	5.94	6.45	6.96	7.47
1.2	4.92	5.46	6.00	6.52	7.05	7.57	8.10
1.4	5.43	6.00	6.54	7.09	7.63	8.17	8.71
1.6	5.95	6.52	7.09	7.65	8.21	8.76	9.31
1.8	6.45	7.05	7.63	8.21	8.78	9.34	9.91
2	6.96	7.57	8.17	8.76	9.34	9.92	10.50
2.2	7.47	8.10	8.71	9.31	9.91	10.50	11.08

Tableau VI.2: Valeurs de l'inductance propre de plusieurs boucles rectangulaire (μH)

Ces résultats se confondent à 100% avec les résultats de simulation numérique en utilisant le logiciel FLUX3D ainsi que ceux récupérés du site « technick.net » [46].

VI.3.3.1.2 Modèle permettant d'avoir la distribution du champ magnétique, créée par une boucle rectangulaire, autour d'une voie de circulation

La distribution du champ magnétique ou de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation permet de définir les zones pauvres du champ. Quand un véhicule se présente dans une de ces zones, sa détection devient difficile ou même impossible.

Selon la loi de Biot et Savart, l'induction magnétique créée à une distance R d'un élément de courant Idl (voir Figure VI.4) est donnée par l'expression suivante :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{R}}{R^3} \quad (\text{VI.12})$$

L'expression qui permet de tracer la distribution de l'induction magnétique est donnée par l'équation (VI.13) :

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{Z + \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z + \frac{L}{2})^2 + r^2}} - \frac{Z - \frac{L}{2}}{\sqrt{(Z - \frac{L}{2})^2 + r^2}} \right] \vec{e}_\phi \quad (\text{VI.13})$$

Avec $\vec{e}_\phi = \vec{e}_z \times \vec{e}_r$

La Figure VI.6 présente la distribution de l'induction magnétique créée par une boucle rectangulaire de dimension $(2; 1,5) m^2$, autour d'une voie de circulation, en deux hauteurs différentes.

CHAPITRE 2

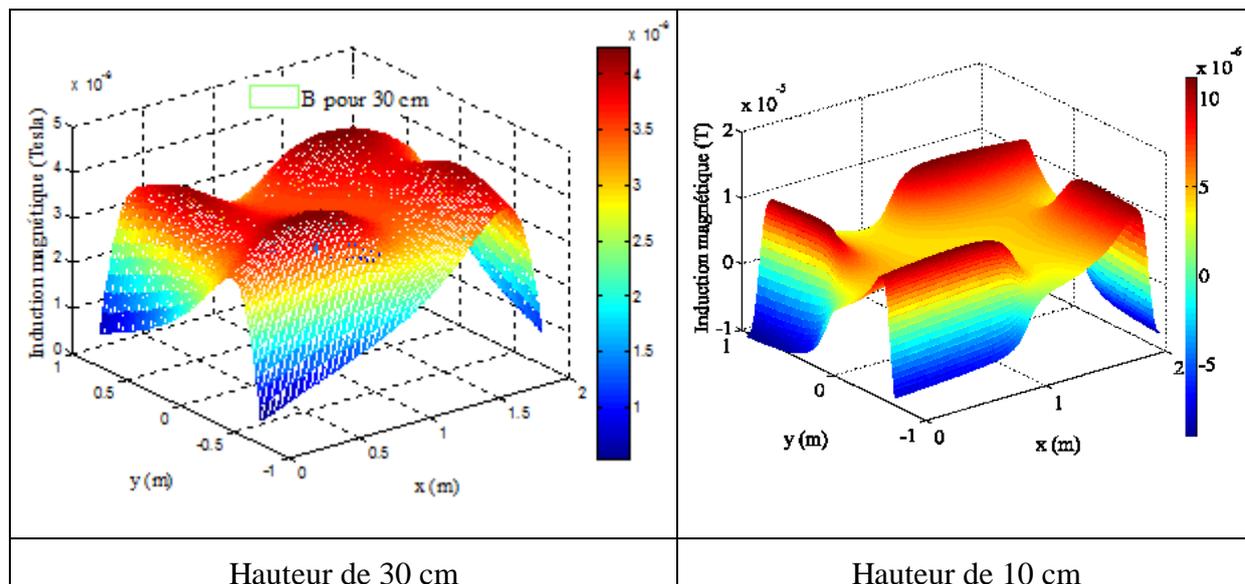


Figure VI.6: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation (obtenue analytiquement)

Les résultats montrent bien que la distribution de l'induction magnétique dépend de la hauteur d'enterrement des boucles. Pour des hauteurs inférieures à 30 cm, les lignes du champ magnétique sont plus concentrées sur le périmètre de la boucle. Pour des hauteurs importantes, le champ magnétique devient plus concentré au milieu de la boucle. Dans les deux cas, des zones pauvres de champ existent. L'idéal est de trouver un compromis dont lequel la distribution du champ est uniforme, avec moins de zones pauvres de champs. Dans ce cas, la détection des véhicules de petit gabarit ne sera pas influencée par la position du véhicule par rapport à la boucle.

Les résultats obtenus sont validés par une simulation numérique sous FLUX3D (voir Figure VI.7 et Figure VI.8). Nous présentons dans la Figure VI.7 la distribution de l'induction magnétique en deux hauteurs différentes. Nous n'avons pas pu obtenir une distribution en 3D vue que le logiciel exige une capacité mémoire très grande. Les résultats obtenus par les deux modèles analytiques et numériques sont presque cohérents.

CHAPITRE 2

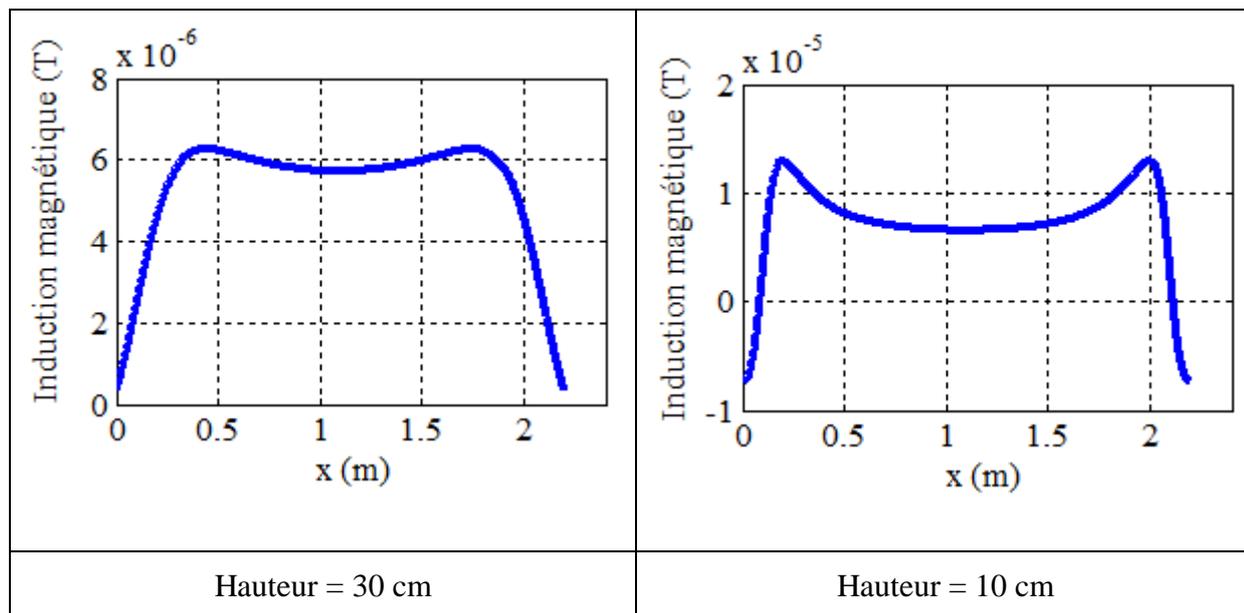


Figure VI.7: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation (obtenue numériquement)

La Figure VI.8 représente deux dégradés de couleurs obtenus par simulation numérique. Ils éclairent bien les zones pauvres et riches de champ magnétique selon si on est sur ou loin du plan. Plus on monte en hauteur plus le champ devient plus concentriques au milieu de la boucle ce qui confirme le modèle analytique.

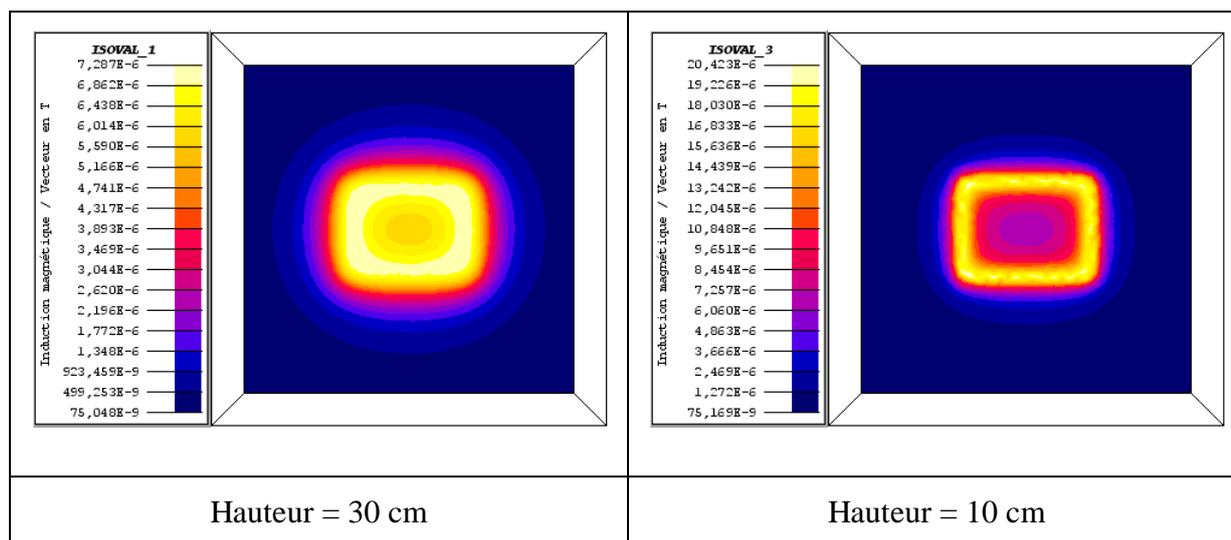


Figure VI.8: Dégradé de couleur qui représente la concentration des lignes de champ autour de la boucle

VI.3.3.1.3 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire située à côté d'une autre boucle

Ce modèle a pour objectif la modélisation de l'interaction entre boucles adjacentes. En effet, la mise en place de boucles adjacentes influe sur l'inductance propre de chacune des deux boucles d'une valeur M appelée inductance mutuelle. Soit S_l un facteur qui caractérise

CHAPITRE 2

l'interaction entre boucles adjacentes. La Figure VI.9 présente deux boucles adjacentes, situées sur le même plan.

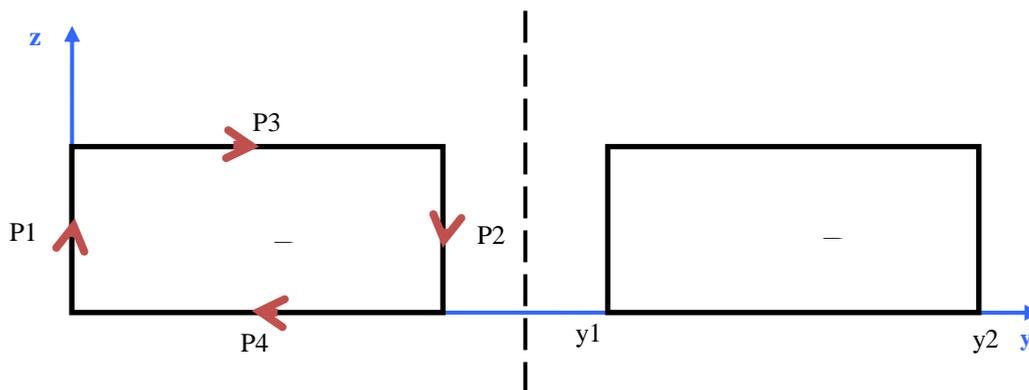


Figure VI.9: Deux boucles électromagnétiques rectangulaires adjacentes

La valeur de l'inductance mutuelle se détermine à partir de l'expression de flux mutuel entre les deux boucles adjacentes. Ce dernier se calcule en intégrant le champ magnétique créé par les quatre portions de la première boucle traversant la deuxième boucle.

En utilisant le théorème de Biot et Savart, l'induction magnétique créée par une portion de fil est donné par l'expression suivante:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[\frac{Z}{\sqrt{Z^2 + r^2}} - \frac{Z-L}{\sqrt{(Z-L)^2 + r^2}} \right] \vec{e}_\phi \quad (\text{VI.14})$$

Les deux boucles sont situées sur le même plan ce qui implique que :

$$x = 0$$

$$r = y$$

Le vecteur $d\vec{S}$ est orienté dans le sens direct selon l'axe x par conséquent :

$$d\vec{S} = -dydz\vec{e}_x$$

Le flux créé par la première boucle est égale à la somme des quatre flux créés par les quatre portions de cette boucle, d'où :

$$\Psi_{12} = \Psi_{P_{1,2}} + \Psi_{P_{2,2}} + \Psi_{P_{3,2}} + \Psi_{P_{4,2}} \quad (\text{VI.15})$$

Le flux créé par la première portion de la première boucle et qui traverse la boucle adjacente se calcule par l'expression (VI.16) :

$$\psi_{P_{1,2}} = \int_{y1}^{y2} \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (\text{VI.16})$$

Après développement de l'expression (VI.16) nous obtenons l'expression de flux $\psi_{P_{1,2}}$

CHAPITRE 2

$$\psi_{p_1,2} = \int_{z_2}^{z_1} \int_{y_1}^{y_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\frac{Z}{\sqrt{Z^2 + y^2}} - \frac{Z-L}{\sqrt{(Z-L)^2 + y^2}} \right) dy dz \quad (\text{VI.17})$$

En intégrant la relation (VI.17), l'expression du flux $\psi_{p_1,2}(Y_1, Y_2, Z_1, Z_2)$ sera donnée par :

$$\psi_{p_1,2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left(\begin{aligned} & \sqrt{Y_2^2 + Z_2^2} - Z_2 \ln \left(Z_2 + \sqrt{Y_2^2 + Z_2^2} \right) - \sqrt{Y_1^2 + Z_2^2} + Z_2 \ln \left(Z_2 + \sqrt{Y_1^2 + Z_2^2} \right) \\ & - \sqrt{Y_2^2 + Z_1^2} + Z_1 \ln \left(Z_1 + \sqrt{Y_2^2 + Z_1^2} \right) + \sqrt{Y_1^2 + Z_1^2} - Z_1 \ln \left(Z_1 + \sqrt{Y_1^2 + Z_1^2} \right) \\ & - \sqrt{Y_2^2 + (Z_2-L)^2} + (Z_2-L) \ln \left((Z_2-L) + \sqrt{Y_2^2 + (Z_2-L)^2} \right) \sqrt{Y_1^2 + (Z_2-L)^2} \\ & - (Z_2-L) \ln \left((Z_2-L) + \sqrt{Y_1^2 + (Z_2-L)^2} \right) \\ & + \sqrt{Y_2^2 + (Z_1-L)^2} - (Z_1-L) \ln \left((Z_1-L) + \sqrt{Y_2^2 + (Z_1-L)^2} \right) - \sqrt{Y_1^2 + (Z_1-L)^2} \\ & + (Z_1-L) \ln \left((Z_1-L) + \sqrt{Y_1^2 + (Z_1-L)^2} \right) \end{aligned} \right) \quad (\text{VI.18})$$

De la même manière se calculent les flux mutuels créés par les portions p_1 , p_2 et p_3 . Les différentes relations reliant les flux mutuels $\psi_{p_2,2}$, $\psi_{p_3,2}$ et $\psi_{p_4,2}$ à $\psi_{p_1,2}$ sont présentées ci-dessous :

$$\psi_{p_2,2} = \psi_{P_1,2}(Y_1 - l, Y_2 - l, Z_1, Z_2) \quad (\text{VI.19})$$

$$\psi_{p_3,2} = \psi_{P_1,2}(r_c, L - r_c, Y_1, Y_2) \quad (\text{VI.20})$$

$$\psi_{p_4,2} = \psi_{P_1,2}(rc - L, -rc, Y_1, Y_2) \quad (\text{VI.21})$$

La sensibilité de la boucle électromagnétique lors la mise en place d'une deuxième boucle se calcule comme suit:

$$S_i = \frac{M_{12}}{L_{boucle}} \quad (\text{VI.22})$$

Sachant que l'inductance mutuelle est définie comme suit :

$$M_{12} = \frac{\psi_{12}}{I} \quad (\text{VI.23})$$

Il apparait bien que la mise en place d'une boucle devant une autre engendre une variation de la valeur de son inductance qui sera traduit par une valeur de sensibilité non nulle. Également, le recouvrement d'une boucle par un véhicule engendre une valeur de sensibilité

CHAPITRE 2

non nulle. Pour cette raison, nous devons établir un seuil de détection qui permet d'éliminer les fausses détections engendrées par les boucles adjacentes et de prendre en compte celles engendrées par les véhicules mis à part les 2RM.

Le Tableau VI.3 présente quelques valeurs de la sensibilité "parasite" entre boucles adjacentes en fonction de la distance de séparation.

Distance entre boucles (cm)	2.5	5	7.5	10	15	20
Sensibilité entre boucles (%)	0.69	0.38	0.25	0.18	0.04	0.06

Tableau VI.3: Variation de la sensibilité entre boucles adjacentes, en fonction de la distance de séparation

VI.3.3.1.4 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire

On considère le terme « sensibilité » pour décrire l'interaction qui se reproduit entre le véhicule et la boucle électromagnétique enterrée dans le sol. Elle est définie par le rapport entre les valeurs de l'inductance propre de la boucle électromagnétique, avant et lors du recouvrement comme présenté dans l'équation (VI.24):

$$S_{loop/vehicle} = \frac{\Delta L}{L_{loop}} \quad (VI.24)$$

Sachant que :

$$\Delta L = L_{loop} - L_{loop_veh}$$

L_{loop} : Inductance de la boucle en absence de véhicule.

L_{loop_veh} : Inductance de la boucle en présence de véhicule.

En effet, un recouvrement partiel ou total d'une boucle électromagnétique engendre une variation de son inductance propre ce qui fait que la sensibilité change de valeur.

En revanche, il est possible qu'un seul véhicule recouvre partiellement deux boucles adjacentes et influe simultanément sur la sensibilité des deux boucles. Pour tous les cas envisagés sur la route, nous devons établir des modèles de calcul de la sensibilité.

Les différents modèles analytiques qui permettent d'estimer la valeur de la sensibilité d'une ou de plusieurs boucles recouvertes totalement ou partiellement par un ou plusieurs véhicules, seront décrit ci-dessous.

VI.3.3.1.4.1 Systèmes équivalents au système réel « boucles électromagnétiques-châssis »

L'objectif est de trouver un modèle magnétostatique équivalent, c'est à dire de déterminer une distribution de courant qui crée le même champ magnétique que les courants induits dans le châssis du véhicule, et qui faire varier la sensibilité de la même valeur.

Suite à plusieurs travaux de simulation numérique et de comparaison, nous avons constaté que :

La plupart des courants induits dans la plaque qui modélise le châssis sont concentrés dans les parties qui se situent en face le périmètre de la boucle.

CHAPITRE 2

Les courants induits dans les parties de la plaque qui ne s'opposent pas le périmètre de la boucle sont négligeables. Ils sont nuls quand la plaque recouvre totalement la boucle électromagnétique [42] [47].

Nous pouvons donc assimiler le système par deux boucles concentrées dont celle qui correspond au châssis est court-circuitée. Dans ce cas, le courant sera induit dans la boucle court-circuitée.

La sensibilité de la boucle électromagnétique peut être assimilée par le rapport de couplage d'un système composé par deux boucles électromagnétiques couplées magnétiquement [47] [42]. L'idée consiste donc à remplacer le châssis du véhicule par une boucle court-circuitée qui a les mêmes dimensions que la boucle électromagnétique [48]. Cette boucle est traversée par un courant qui représente le courant induit dans le châssis. La valeur de ce courant dépendra de la position latérale du châssis, par rapport à la boucle électromagnétique, et de la position longitudinale.

La Figure VI.10 présente le système équivalent du système réel composé d'un châssis et d'une boucle enterrée dans le sol.

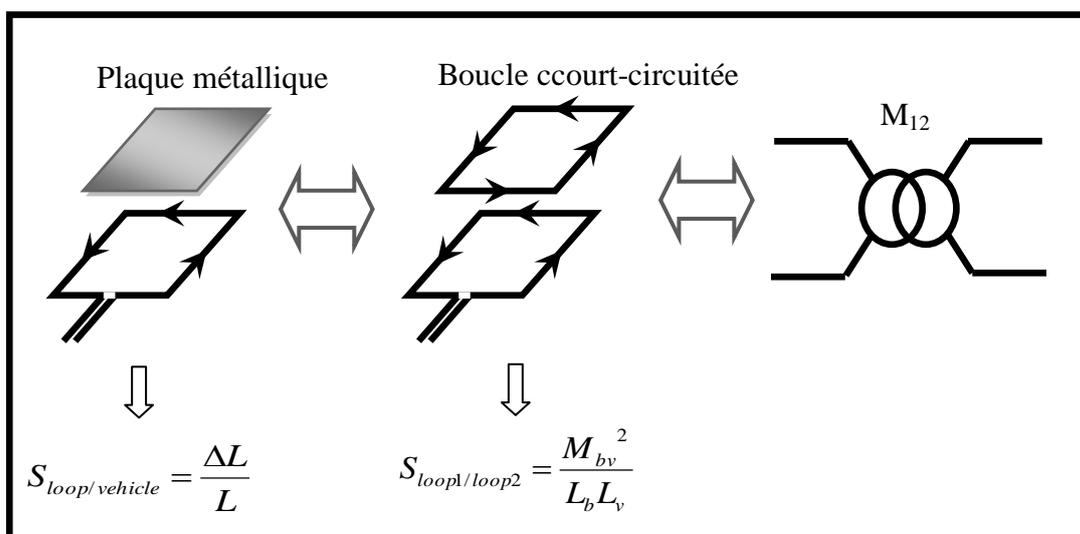


Figure VI.10 : Système équivalent 1

Le couplage entre le châssis, représenté par une boucle court-circuitée, et la boucle électromagnétique est assimilé à un transformateur à noyau d'air.

La sensibilité est estimée par le rapport de couplage du transformateur à noyau d'air représenté sur la Figure VI.10 [9]. Son expression est donnée comme suit :

$$S_{loop/vehicle} = \frac{M_{12}^2}{L_{loop} L_{veh}} \quad (VI.25)$$

On définit :

M_{12} : L'inductance mutuelle de la boucle électromagnétique.

L_{loop} : L'inductance propre de la boucle électromagnétique.

L_{veh} : L'inductance de la boucle court-circuitée.

CHAPITRE 2

L'inductance mutuelle entre le primaire et le secondaire se calcule à partir de l'expression de flux :

$$M_{1/2} = \frac{\Psi_{12}}{I} \quad (\text{VI.26})$$

VI.3.3.1.4.2 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire traversée par un véhicule

Nous détaillerons dans cette section le modèle de la sensibilité du « système équivalent 1 » qui décrit l'interaction qui se présente entre un châssis et une boucle électromagnétique enterrée dans le sol.

La démarche à suivre pour déterminer le modèle de la sensibilité consiste à calculer l'expression de flux généré par la boucle électromagnétique enterrée dans le sol, et qui traverse la boucle court-circuitée. Ce flux se calcule en partant de l'expression de l'induction magnétique créée par une portion de fil.

Conformément à la loi de Biot et Savart, l'induction magnétique créée à une distance donnée $R(r, Z)$, par une portion de longueur L (voir figure 3.5), traversée par un courant I est donnée par l'expression (VI.27):

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \left[\frac{Z}{\sqrt{Z^2 + r^2}} - \frac{Z-L}{\sqrt{(Z-L)^2 + r^2}} \right] \vec{e}_{\phi 1} \quad (\text{VI.27})$$

On note que l'expression (VI.27) est obtenue en appliquant la même étude utilisée pour obtenir l'expression (VI.8) avec un référentiel différent [49].

Sachant que le flux à travers le châssis ne dépend que de la composante B_x . Cette composante se calcule comme suit (voir Figure VI.11) :

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{yz}{r^2 \sqrt{Z^2 + r^2}} - \frac{(Z-L)y}{r^2 \sqrt{(Z-L)^2 + r^2}} \right] \quad (\text{VI.28})$$

Étant donnée que :

$$r^2 = (x^2 + y^2)$$

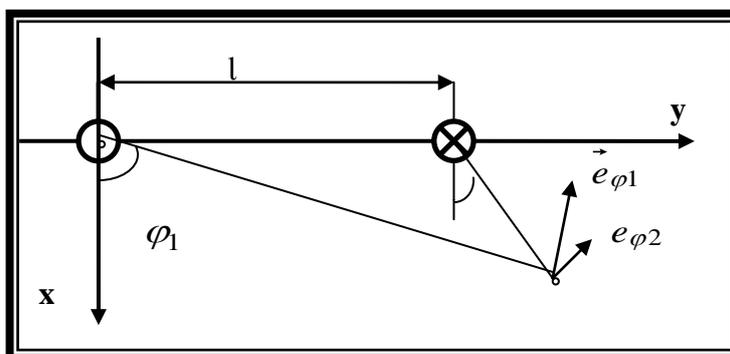


Figure VI.11: La composante normale de l'induction magnétique

CHAPITRE 2

En remplaçant l'expression de r dans (VI.28), l'expression de la composante normale devient :

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \left[\frac{yz}{(x^2 + y^2)\sqrt{Z^2 + (x^2 + y^2)^2}} - \frac{(Z-L)y}{(x^2 + y^2)\sqrt{(Z-L)^2 + (x^2 + y^2)^2}} \right] \quad (\text{VI.29})$$

Le flux créé par la composante normale à travers la boucle court-circuitée, se calcule par l'expression (VI.30):

$$\psi_{P1v} = \int_{z1}^{z2} \int_{y1}^{y2} B_x dydz \quad (\text{VI.30})$$

En remplaçant l'expression (VI.29) dans (VI.30), l'expression (VI.30) devient :

$$\psi_{P1v} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} [I_1 + I_2] \quad (\text{VI.31})$$

Notons que,

$$I_1 = \int_{y1}^{y2} \int_{z1}^{z2} \frac{yz}{(x^2 + y^2)\sqrt{z^2 + (x^2 + y^2)}} dydz$$

$$I_2 = \int_{y1}^{y2} \int_{z1}^{z2} \frac{(z-L)y}{(x^2 + y^2)\sqrt{(z-L)^2 + (x^2 + y^2)}} dydz$$

L'intégral I_1 se calcule comme suit :

$$I_1 = \int_{y1}^{y2} \frac{y}{(x^2 + y^2)} \left[\int_{z1}^{z2} \frac{z}{\sqrt{z^2 + (x^2 + y^2)}} dz \right] dy$$

$$I_1 = \int_{y1}^{y2} \frac{y}{(x^2 + y^2)} \left[\sqrt{z^2 + (x^2 + y^2)} \right]_{z1}^{z2} dy$$

L'intégral I_1 dépend qu'un seul variable :

$$I_1 = \int_{y1}^{y2} \left[\frac{y\sqrt{Z2^2 + (x^2 + y^2)}}{(x^2 + y^2)} - \frac{y\sqrt{Z1^2 + (x^2 + y^2)}}{(x^2 + y^2)} \right] dy$$

En faisant le changement de variable convenable en remplaçant :

$$t = (x^2 + y^2)$$

$$dy = \frac{dt}{2y}$$

$$Z1^2 = a$$

$$Z2^2 = b$$

$$t_1 = (x^2 + y_1^2)$$

$$t_2 = (x^2 + y_2^2)$$

L'intégral I_1 devient:

$$I_1 = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{\sqrt{a+t}}{t} - \frac{\sqrt{b+t}}{t} \right] dt$$

En faisant un autre changement de variable en remplaçant :

$$\sqrt{a+t} = u$$

$$dt = 2u du$$

$$u_{a1} = \sqrt{a+t_1}$$

$$u_{a2} = \sqrt{a+t_2}$$

L'expression de l'intégral I_1 devient:

$$I_1 = \int_{u_{b1}}^{u_{b2}} \frac{u_b^2}{u_b^2 - b} du - \int_{u_{a1}}^{u_{a2}} \frac{u_a^2}{u_a^2 - a} du$$

En simplifiant :

$$I_1 = \int_{u_{b1}}^{u_{b2}} dU_b - \int_{u_{b1}}^{u_{b2}} \frac{b}{U_b^2 - b} dU_b - \int_{u_{a1}}^{u_{a2}} dU_a + \int_{u_{a1}}^{u_{a2}} \frac{a}{U_a^2 - a} dU_a$$

Après calcul, nous avons eu le résultat de calcul de I_1 :

$$I_1 = U_{b2} - U_{b1} - U_{a2} + U_{a1} + \frac{\sqrt{b}}{2} \ln \left| \frac{U_{b2} - 1}{\sqrt{b}} \right| - \frac{\sqrt{b}}{2} \ln \left| \frac{U_{b1} - 1}{\sqrt{b}} \right| - \frac{\sqrt{a}}{2} \ln \left| \frac{U_{a2} - 1}{\sqrt{a}} \right| + \frac{\sqrt{a}}{2} \ln \left| \frac{U_{a1} - 1}{\sqrt{a}} \right|$$

Étant donné que :

$$U_{b2} = \sqrt{x^2 + y_2^2 + z_2^2}$$

$$U_{b1} = \sqrt{x^2 + y_1^2 + z_2^2}$$

$$U_{a2} = \sqrt{x^2 + y_2^2 + z_1^2}$$

$$U_{a1} = \sqrt{x^2 + y_1^2 + z_1^2}$$

$$a = z_1^2$$

$$b = z_2^2$$

CHAPITRE 2

Le développement de l'intégral I_2 se fait en suivant la même démarche. Nous avons comme résultat l'expression suivante :

$$I_2(Z_1, Z_2) = I_2(Z_1 - L, Z_2 - L)$$

Enfin, on en déduit l'expression du flux de chaque portion:

$$\psi_{P_{1v}}(y1, y2, z1, z2, l, L) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} [I_1 + I_2] \quad (\text{VI.32})$$

$$\psi_{P_{2v}} = \psi_{P_{1v}}(y1, y2, z1, z2, l, L) \quad (\text{VI.33})$$

$$\psi_{P_{3v}} = \psi_{P_{1v}}(z1, z2, y1, y2, L, l) \quad (\text{VI.34})$$

$$\psi_{P_{4v}} = \psi_{P_{1v}}(z1, z2, y1, y2, L, l) \quad (\text{VI.35})$$

Le flux total à travers la boucle court-circuitée est la somme des quatre flux partiels:

$$\psi_{1v} = \psi_{P_{1v}} + \psi_{P_{2v}} + \psi_{P_{3v}} + \psi_{P_{4v}} \quad (\text{VI.36})$$

La mutuelle entre la boucle électromagnétique enterrée dans le sol et la boucle court-circuitée se déduit directement à partir de l'expression de flux. Elle est égale à :

$$M_{12} = \frac{\Psi_{1v}}{I}$$

VI.3.3.1.4.3 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire traversée par deux véhicules

Parmi les scénarios qui peuvent se reproduire sur la chaussée le cas où deux véhicules recouvrent la même boucle et le cas où un seul véhicule recouvre deux boucles électromagnétiques.

Il n'existe aucune interaction magnétique entre les deux véhicules adjacents. Ainsi, le modèle représentant deux châssis en interaction avec une boucle électromagnétique peut être décomposé en deux modèles découplés, comme indiqué sur la Figure VI.12. La sensibilité sera égale à la somme des deux sensibilités : $S_{12} + S_{13}$

De même, le « système réel » qui représente un châssis en interaction avec deux boucles est en réalité un couplage de deux systèmes. Il suffit de le découpler en deux sous système pour l'étudier. Pour chaque boucle électromagnétique, on calcule la valeur de la sensibilité affectée par le véhicule.

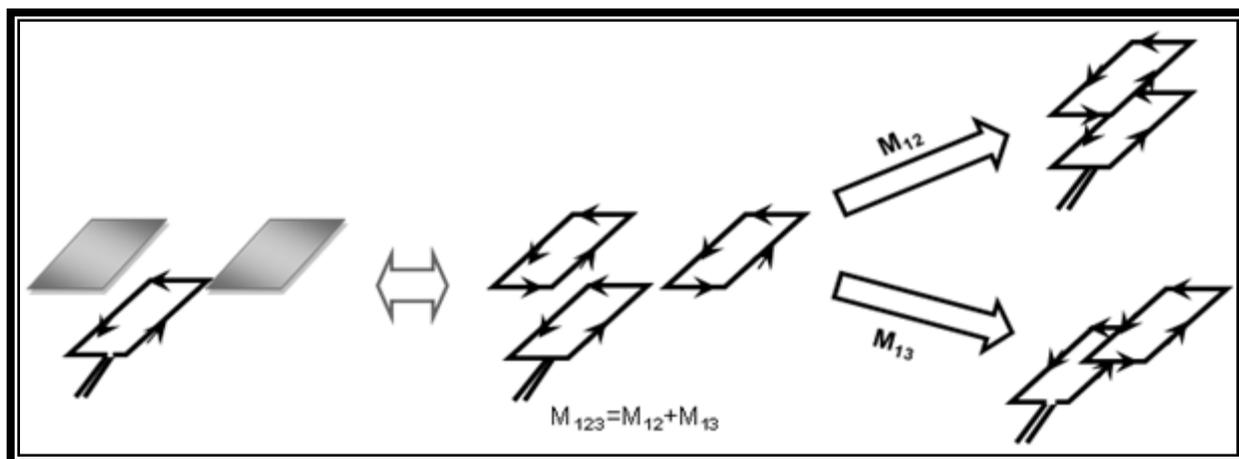


Figure VI.12: Système équivalent de deux châssis en interaction avec une seule boucle.

VI.3.3.1.4.4 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle rectangulaire en fonction de la position latérale du véhicule sur la voie

Il arrive qu'un véhicule traverse la boucle électromagnétique enterrée dans le sol en plein milieu (recouvrement total) comme il peut arriver qu'un autre véhicule ne la traverse pas en son milieu (recouvrement partiel). La Figure VI.13 présente l'évolution des modèles équivalents selon le mode de recouvrement. Plus il est grand plus la valeur de la sensibilité augmente.

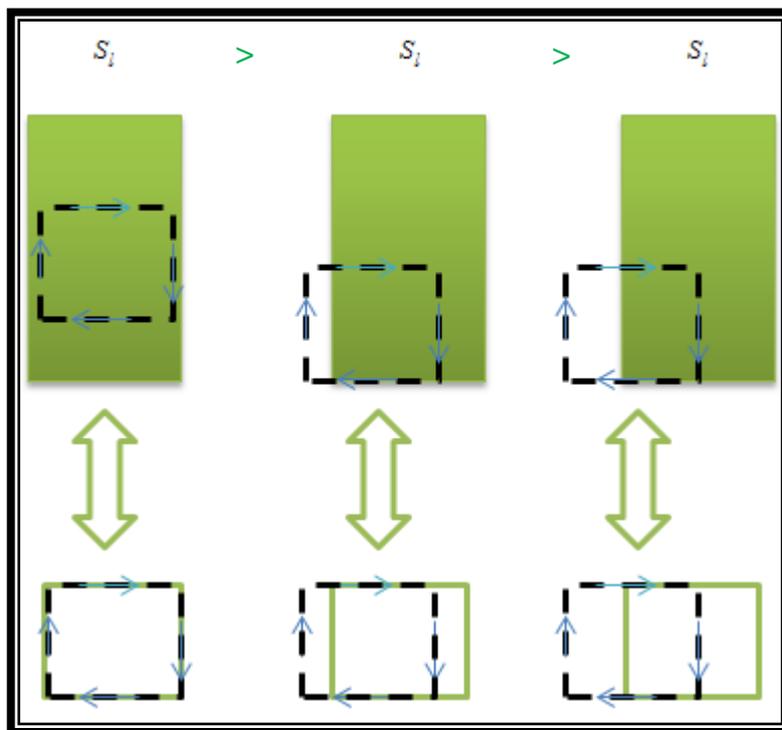


Figure VI.13: Évolution du système équivalent selon le recouvrement de la boucle électromagnétique

CHAPITRE 2

Nous présentons dans le Tableau VI.4 la variation de la sensibilité d'une boucle de $(1,75; 1,5) m^2$ en fonction de son recouvrement pour différents véhicules.

Recouvrement (%) H châssis (cm)	100	66.6	62.8	50	42.8	34.3	0
14	7.92	2.55	2.20	1.25	0.85	0.48	0.09
12.1	9.14	2.82	2.43	1.38	0.94	0.53	0.12
18.1	6.01	2.12	1.83	1.04	0.71	0.40	0.04

Tableau VI.4: Variation de la sensibilité maximale d'une boucle rectangulaire de dimensions $(1,75 ; 1,5) m^2$

La boucle devra être placée sur la chaussée de telle sorte que le véhicule recouvre au moins 50 % de sa surface. Dans ce cas, nous pouvons considérer un seuil de détection de 1 % qui permet à la fois de tenir compte la présence de tous les véhicules mis à part les 2RM dont leur sensibilité reste inférieure à 0.6 %.

VI.3.3.1.5 Modèle pour tracer la signature d'un véhicule traversant une boucle rectangulaire

Nous définissons la signature d'un véhicule comme étant l'évolution de la sensibilité pendant le passage d'un véhicule au-dessus d'une boucle électromagnétique.

La Figure VI.14 présente la signature d'un VL obtenue par une simulation numérique et analytique.

- Le VL dispose d'une hauteur de châssis de 140 mm.
- La boucle électromagnétique est de dimension $(2 ; 1,5) m^2$.

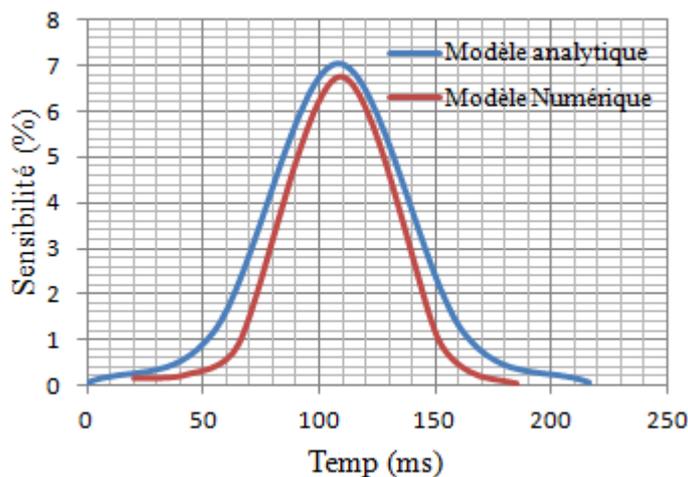


Figure VI.14: Signature d'une voiture traversant une boucle rectangulaire

La signature présentée dans la Figure VI.14 a été obtenue en considérant un châssis dont la longueur de sa partie centrale est égale à la longueur de la boucle électromagnétique (Figure VI.15.a). Or dans la réalité la longueur du châssis peut être plus grande que la boucle électromagnétique (voir Figure VI.15). Dans ce cas, la valeur de la sensibilité reste constante

CHAPITRE 2

durant une période qui correspond à un recouvrement constant, c'est le cas des situations présentées sur la Figure VI.15. Cette période dépend de la longueur du châssis et de la vitesse du véhicule.

La correction du modèle de la signature consiste à étendre le sommet de la courbe horizontalement en gardant sa valeur constante pendant cette période.

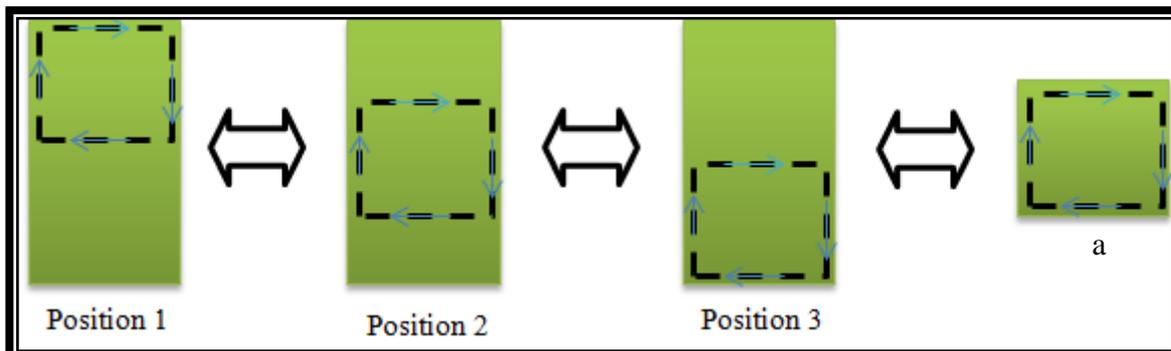


Figure VI.15: Différentes positions relatives du châssis par rapport à la boucle

Cette période se calcule en connaissant la vitesse du véhicule, la longueur de la boucle et la longueur de la partie centrale du châssis, comme indiqué sur la Figure VI.16.

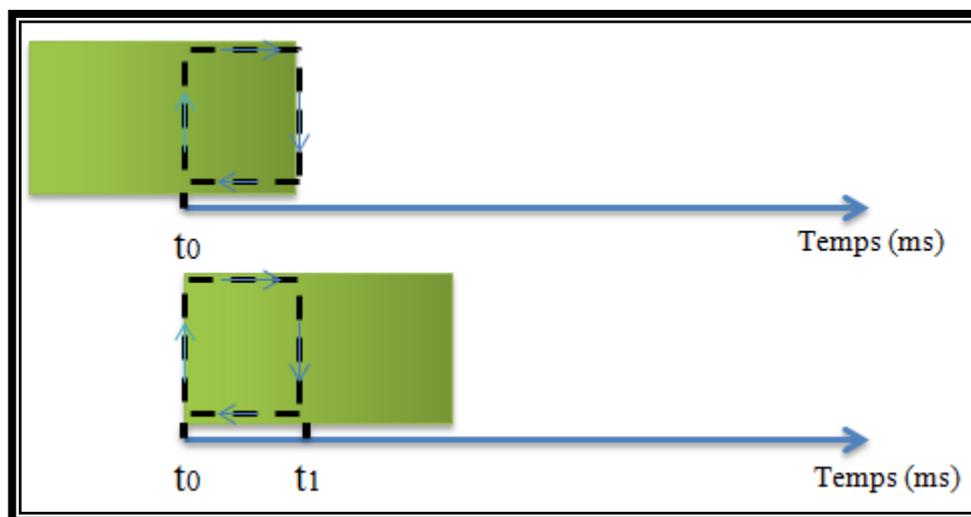


Figure VI.16: Positions du début et de la fin de recouvrement.

t_0 : Correspond à l'instant où le recouvrement est complet

t_1 : Correspond à l'instant où le recouvrement complet cesse

Le Tableau VI.5 présente les valeurs de la période d'extension pour différentes vitesses en considérant :

- Longueur de la partie centrale du châssis = 2,5 m
- Longueur de la boucle électromagnétique = 1,5 m

CHAPITRE 2

vitesse (km/h)	30	50	70	90	110	130
Extension du sommet (ms)	120	72	51,43	40	32,70	27,7

Tableau VI.5: Extension du sommet pour différentes vitesses

VI.3.3.2 Modèles développés pour le système 2 : Cas des boucles de forme circulaire

Après avoir présenté le premier simulateur qui reproduit le même comportement magnétique que le système réel constitué de boucles rectangulaires et de châssis des véhicules, nous présenterons dans cette section le deuxième simulateur. La petite modification apportée au système réel réside au niveau de la boucle électromagnétique. Nous avons remplacé la boucle rectangulaire par une autre de forme circulaire afin de comparer l'avantage de l'une sur l'autre. Les différents modèles développés pour le deuxième simulateur sont les suivants :

VI.3.3.2.1 Modèle de calcul de l'inductance propre d'une boucle circulaire

Dans cette section, nous développons le modèle de calcul de l'inductance propre d'une boucle circulaire de rayon a (voir Figure VI.17). Nous supposons que le courant I est réparti uniformément sur toute la section transversale du conducteur de rayon r_c .

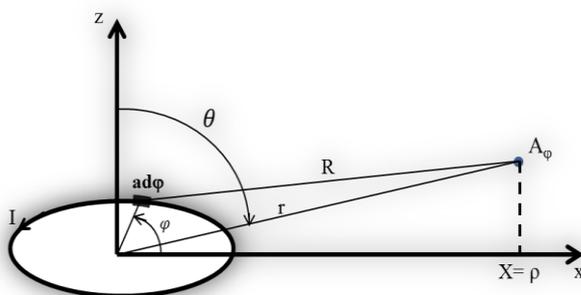


Figure VI.17: Boucle électromagnétique circulaire

L'induction magnétique créée à une distance R de l'élément de courant est calculée en dérivant l'expression du vecteur potentiel magnétique :

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \quad (\text{VI.37})$$

En raison de la symétrie du courant traversant la boucle, le champ magnétique sera déterminé pour tous les points (r, θ, φ) dans un système de coordonnées sphériques, il est indépendant de φ dans tous les cas. Le vecteur potentiel magnétique A_φ est dans le sens de φ et est défini par :

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{dl_\varphi}{R} \quad (\text{VI.38})$$

Nous définissons :

CHAPITRE 2

Idl_φ : Le contour de courant

R : La distance séparant l'élément de courant Idl_φ du point M.

Nous définissons aussi les paramètres géométriques suivants :

$$dl_\varphi = a d\varphi \cos\varphi$$

$$R^2 = a^2 + \rho^2 + z^2 - 2a\rho \cos\varphi$$

$$r^2 = z^2 + \rho^2$$

$$\rho = r \sin\theta$$

On aura après le remplacement de ces variables dans (VI.38), l'expression de A_φ suivante :

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \oint \frac{a d\varphi \cos\varphi}{\sqrt{a^2 + \rho^2 + z^2 - 2a\rho \cos\varphi}} \quad (\text{VI.39})$$

Le calcul l'inductance propre d'une boucle circulaire dépend que de la composante normale de l'induction magnétique calculée sur le plan de boucle. Cette composante se calcule à partir de la composante normale du vecteur potentiel magnétique en considérant $z = 0$. Sur le plan $z = 0$, l'expression du vecteur potentiel magnétique devient :

$$A_\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a d\varphi \cos\varphi}{\sqrt{a^2 + r^2 - 2ar \cos\varphi}} \quad (\text{VI.40})$$

L'induction magnétique se calcule à partir de l'expression du vecteur potentiel magnétique comme indiqué dans l'équation (VI.41) :

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(rA_\varphi)}{\partial r} \quad (\text{VI.41})$$

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \int_{\varphi=0}^\pi \frac{a^2 \cos\varphi (a - r \cos\varphi)}{(a^2 + r^2 - 2ar \cos\varphi)^{3/2}} d\varphi \quad (\text{VI.42})$$

Le flux à travers la section de la boucle électromagnétique se calcule comme suit:

$$\psi_{boucle} = \int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{a-r\cos\varphi} B_z r dr d\varphi' \quad (\text{VI.43})$$

En remplaçant (VI.42) dans (VI.43), nous obtenons :

$$\psi_{loop} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{\varphi'=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{a-r\cos\varphi} \frac{1}{r} \left[\int_{\varphi=0}^\pi \frac{a^2 \cos\varphi (a - r \cos\varphi)}{(a^2 + r^2 - 2ar \cos\varphi)^{3/2}} dr \right] d\varphi \quad (\text{VI.44})$$

Le calcul du premier intégrale nous a permis de simplifier l'expression (VI.44) à :

$$\Psi_{loop} = \mu_0 I a (a - r_w) \int_{\varphi=0}^{\pi} \frac{2 \sin^2 \theta - 1}{(2a - r_x) \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\varphi \quad (VI.45)$$

Avec :

$$k = \frac{4a(a - r_c)}{(2a - r_c)}$$

Enfin, l'expression de l'inductance de la boucle électromagnétique se déduit de l'expression du flux comme suit :

$$L_{boucle} = \frac{\Psi_{boucle}}{I} \quad (VI.46)$$

Après développement des expressions précédentes nous avons obtenus le modèle suivant :

$$L_{boucle} = \mu_0 \sqrt{a(a - r_c)} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (VI.47)$$

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

La valeur de l'inductance dépend du rayon de la boucle circulaire a et du rayon du conducteur r_c .

Les deux intégrales elliptiques $K(k)$ et $E(k)$ ont été résolues numériquement [50].

Le Tableau VI.6 présente les valeurs de l'inductance propres de différentes boucles circulaires.

R(m)	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6
L(μH)	2.73	4.41	6.17	8	9.87	11.8	13.74	15.73	17.74	19.78	21.84	23.92

Tableau VI.6: Inductance propre de plusieurs boucles circulaires

VI.3.3.2 Modèle permettant d'avoir la distribution du champ magnétique, créé par une boucle circulaire, autour d'une voie de circulation

La valeur de l'induction magnétique en un point M est obtenue en intégrant numériquement l'expression (VI.42).

La Figure VI.18 présente la distribution de l'induction magnétique créée par une boucle de forme circulaire de rayon $1m$ autour d'une voie de circulation de $4m$ de largeur.

CHAPITRE 2

Les résultats montrent bien que le champ magnétique créé par une boucle circulaire autour d'elle-même est moins uniforme que le champ créé par une boucle rectangulaire. Même pour des hauteurs élevées, le champ reste concentré sur le périmètre de la boucle.

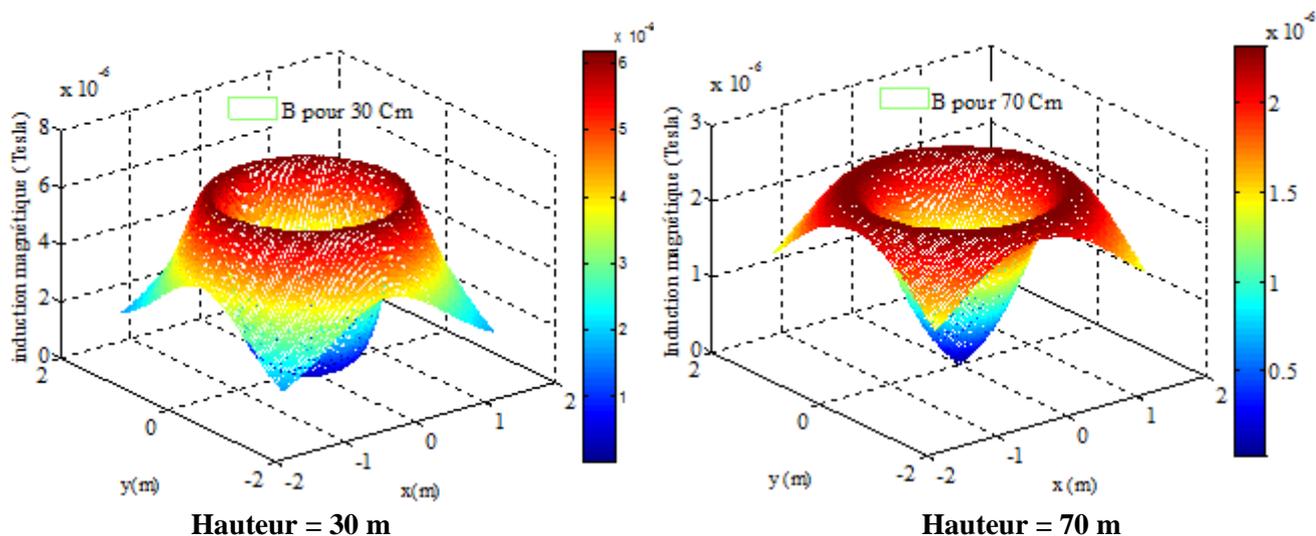


Figure VI.18: Distribution de l'induction magnétique autour d'une voie de circulation

VI.3.3.2.3 Model de calcul de la sensibilité d'une boucle circulaire

Nous présentons dans cette section les modèles de calculs de la sensibilité pour les différents scénarios qui peuvent se reproduire sur le trafic. Ce sont les mêmes scénarios présentés pour le système équivalent 1.

VI.3.3.2.3.1 Système équivalent au système réel « boucles électromagnétiques – châssis »

Le modèle magnétostatique équivalent pour le cas d'une boucle circulaire est obtenu en suivant le même raisonnement que pour le cas d'une boucle de forme rectangulaire. Deux boucles de forme circulaire, dont une est court-circuitée, représente le modèle magnétostatique équivalent (voir Figure VI.19).

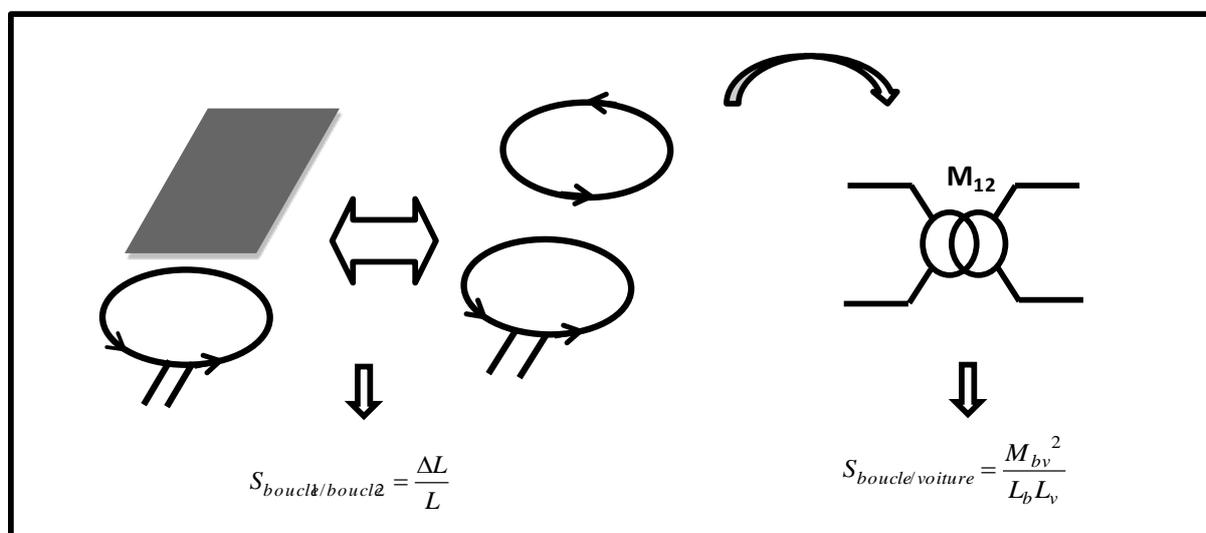


Figure VI.19 : Système équivalent 2

CHAPITRE 2

VI.3.3.2.3.2 Modèle de calcul de la sensibilité maximale d'une boucle circulaire

Nous présentons dans ce paragraphe le modèle de calcul de la sensibilité quand la boucle est totalement recouverte par le châssis (voir Figure VI.20). Dans ce cas, tous les courants internes induits dans le châssis sont nuls, ce qui est équivalent à une simple boucle court-circuitée.

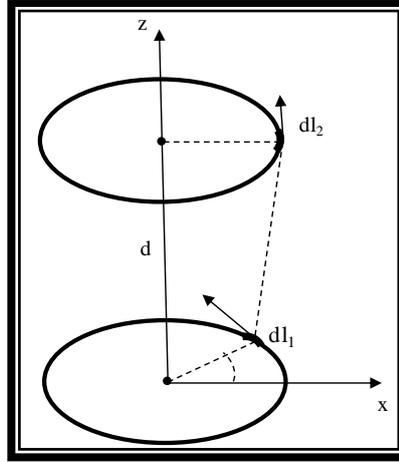


Figure VI.20: Modèle utilisé pour calculer la sensibilité maximale entre la boucle circulaire et le châssis

La sensibilité de la boucle électromagnétique se calcule à partir de l'inductance mutuelle entre la boucle électromagnétique enterrée dans le sol et la boucle court-circuitée qui modélise le châssis.

Selon la formule Neumann, l'inductance mutuelle entre deux éléments de courant dl_1 et dl_2 (voir Figure VI.20) est donnée par:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi r} \iint \frac{\vec{dl}_1 \vec{dl}_2}{R_{12}} \quad (\text{VI.48})$$

Après développement du produit scalaire $\vec{dl}_1 \vec{dl}_2$, l'expression de la mutuelle M_{12} devient :

$$M_{12} = \frac{\mu_0 ab}{4\pi r} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{a^2 + b^2 + d^2 - 2ab \cos(\varphi)}} d\varphi d\varphi' \quad (\text{VI.49})$$

En intégrant par rapport à φ' , l'expression (VI.49) devient :

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \sqrt{ab}}{2} \int_0^\pi \frac{k \cos(2\varphi)}{\sqrt{1 - k^2 \cos^2(\varphi)}} d\varphi \quad (\text{VI.50})$$

L'expression (VI.50) peut être met sous la forme suivante :

$$M_{12} = \frac{\mu_0 \sqrt{ab}}{2} \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{2}{k} - k \right) \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cos^2(\varphi)}} d\varphi - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{2}{k} \right) \sqrt{1 - k^2 \cos^2(\varphi)} d\varphi \right] \quad (\text{VI.51})$$

Posons $k = \frac{4a(a - r_c)}{(2a - r_c)}$

On voit bien l'apparition de deux intégrales elliptiques.

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi}}$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \varphi} d\varphi$$

L'expression de la mutuelle se résume à :

$$M_{12} = \mu_0 \sqrt{ab} \left[\left(\frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right] \quad (\text{VI.52})$$

Les deux intégrales elliptiques $K(k)$ et $E(k)$ se calculent numériquement [50].

Rappelons que la sensibilité de la boucle circulaire dans ce cas est estimée par le rapport :

$$S_{loop/vehicle} = \frac{M_{12}^2}{L_{loop} L_{veh}}$$

La Figure VI.21 présente la variation de la sensibilité en fonction de la hauteur du châssis de différents véhicules.

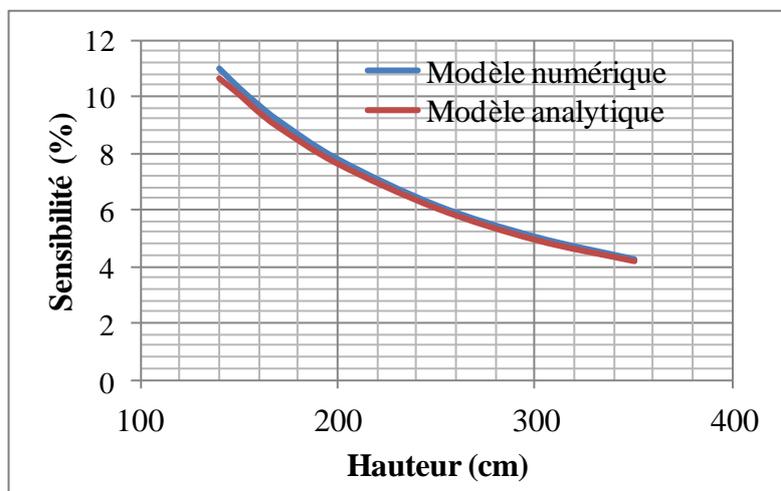


Figure VI.21: Variation de la sensibilité en fonction de la hauteur du châssis

Les résultats obtenus montrent que la valeur de la sensibilité est inversement proportionnelle à la hauteur du châssis.

CHAPITRE 2

VI.3.3.2.3.3 Modèle de calcul de la sensibilité d'une boucle circulaire traversée par un véhicule. Modèle de calcul de la sensibilité parasite entre boucle adjacentes

Nous présentons dans ce paragraphe un modèle qui permet à la fois le calcul de la sensibilité "parasite" entre boucles adjacentes, et de calculer la sensibilité d'une boucle circulaire recouverte partiellement ou totalement par un véhicule.

La sensibilité entre boucles est dite parasite car elle peut générer une fausse détection.

Le système réel « véhicule-boucle » ou « boucle-boucle » est similaire à deux boucles circulaires non concentrées (voir Figure VI.22) :

Lorsque $c = 0$, on retrouve le système « boucle-boucle »

Lorsque $c \neq 0$, on retrouve le système « véhicule-boucle »

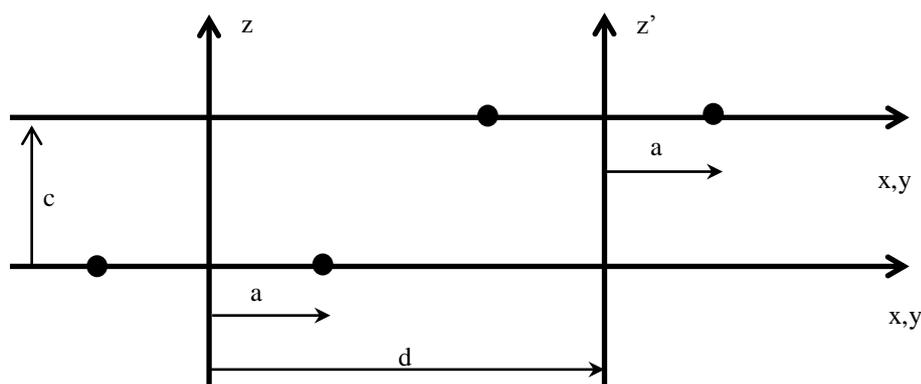


Figure VI.22 : Système équivalent 2

Nous avons utilisé une formule qui existe dans la littérature nommée formule de Grover [51] [52], pour calculer l'inductance mutuelle entre les deux boucles circulaires non concentrique (voir Figure VI.20) [13]. Ainsi, le modèle développé pour l'inductance mutuelle entre ces deux boucles est définie par:

$$M = 2 \frac{\mu_0}{\pi} \int_0^\pi \frac{(1 - \frac{d}{a} \cos \varphi) \psi(k)}{k \sqrt{V^3}} d\varphi \quad (VI.53)$$

On définit :

d : La distance entre le milieu des boucles circulaires.

c : La distance séparant les deux plans des deux boucles

$$\beta = \frac{c}{a}$$

$$V = \sqrt{1 + \frac{d^2}{a^2} - 2 \frac{d}{a} \cos \varphi}$$

$$\psi(k) = (1 - \frac{k^2}{2})K(k) - E(k) : \text{Le flux mutuel}$$

CHAPITRE 2

Étant donné que le facteur k est donné par l'expression suivante :

$$k^2 = \frac{4V}{(1+V)^2 + \beta^2}$$

Le Tableau VI.7 présente quelques valeurs de la sensibilité parasite, en fonction de la distance de séparation des boucles.

Distance entre boucles (cm)	0	5	10	20	40
Sensibilité entre boucles (%)	5.02	2.25	1.5	0.48	0.30

Tableau VI.7: Variation de la sensibilité parasite en fonction de la distance de séparation

On voit bien que : si on sépare les deux boucles adjacentes de 20 cm, la valeur de la sensibilité parasite est égale à 0.48 %. Donc, il suffit de prendre un seuil de détection supérieure à 0.48 % pour éviter les fausses détections engendrées par les boucles adjacentes.

VI.3.3.2.4 Modèle pour tracer la signature d'un véhicule traversant une boucle circulaire

La signature est définie comme étant l'évolution de la valeur de la sensibilité pendant le temps de présence d'un véhicule au-dessus d'une boucle enterrée dans le sol.

Les modèles analytiques et numériques développés sont simulés sur des outils de simulation (Matlab et Flux3D). Ils donnent comme résultats deux courbes de signature pour les deux modèles analytiques et numériques (voir Figure VI.23). La Figure VI.23 correspond à la signature d'un véhicule, d'un châssis de hauteur de 20 cm, se déplaçant à une vitesse de 50 km / h, traversant le milieu d'une boucle circulaire de rayon de 1 m.

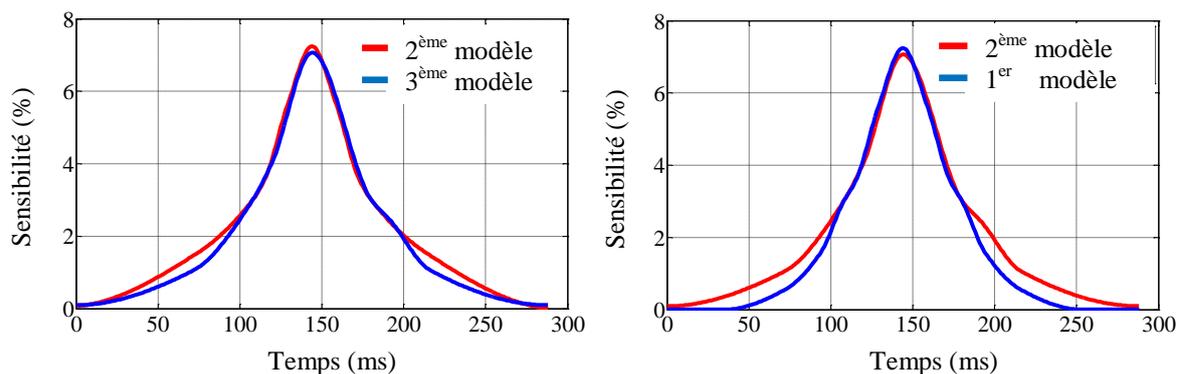


Figure VI.23: Signature d'un véhicule traversant une boucle circulaire

La sensibilité maximale est d'environ 7,5 % pour le premier modèle numérique, 7,10 % pour le second modèle numérique et 7,15 % pour le modèle analytique. Le second modèle numérique correspond au système magnétostatique équivalent simulé sous Flux3D. Nous pouvons noter que le détecteur électronique ne reflète que la valeur maximale pour indiquer le passage d'un véhicule [53]. La forme de la signature dépend également de la vitesse du véhicule; il est plus étroit lorsque la vitesse est grande.

CHAPITRE 2

Le troisième modèle correspond à la signature obtenue en simulant le système équivalent 2 sous FLUX3D.

De même que le système équivalent 1, nous avons établi une démarche de rectification de la courbe de la signature qui consiste à détendre le sommet du graphique obtenu pendant une période de temps. Cette période comme cité précédemment dépend de la longueur du châssis, de la longueur de la boucle enterrée dans le sol et de la vitesse du véhicule.

Le Tableau VI.8 présente la période d'extension du sommet de la sensibilité pour différentes vitesses, en considérant :

- Longueur de la partie du châssis considérée= 2,5 m
- Longueur de la boucle électromagnétique=1,5 m

Vitesse (km/h)	30	50	70	90	110	130
Extension du sommet (ms)	60	36	25,71	20	16,36	13,85

Tableau VI.8: Extension du sommet pour différentes vitesses

VI.4 Calibrage des modèles établis pour le système équivalent 1

Il faut préciser que la valeur de la sensibilité dépend aussi de la valeur de la fréquence et de la perméabilité du matériau constituant le châssis du véhicule. Nous avons calculé en utilisant le logiciel FLUX3D la valeur de sensibilité d'une boucle rectangulaire pour plusieurs valeurs de perméabilité. La Figure VI.24 montre l'influence de la variation de la perméabilité sur la valeur de la sensibilité. Les valeurs prises correspondent bien aux perméabilités de plusieurs types d'acier qui entrent dans la construction des châssis des véhicules. L'objectif est de proposer une approche qui permet d'atteindre une certaine précision dans le calcul de la sensibilité. Cela peut être très utile si la discrimination de quelques types de véhicules se joue sur quelques petites différences.

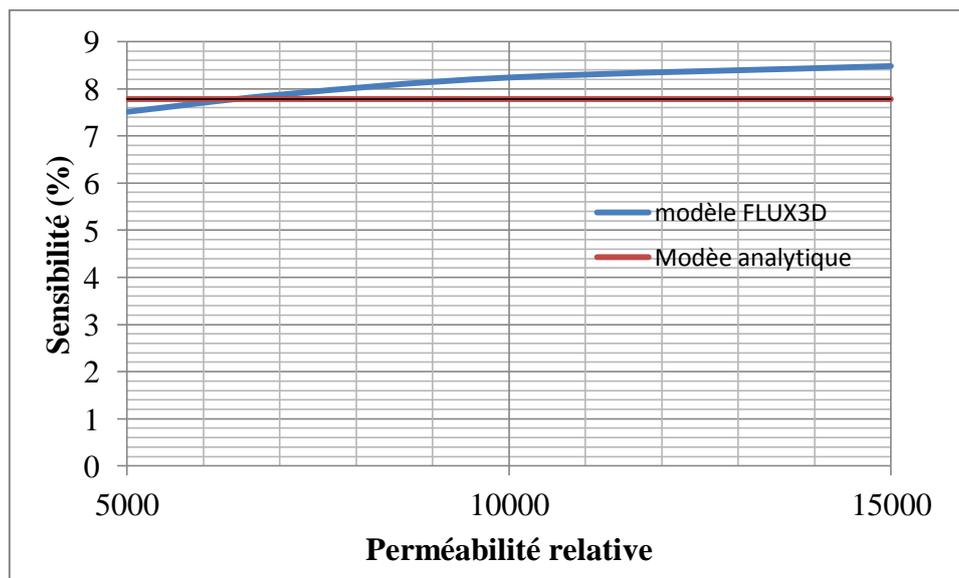


Figure VI.24: Variation de la sensibilité en fonction de la perméabilité

VI.4.1 Calibrage du modèle de la sensibilité par rapport au changement de la perméabilité

Le modèle de la sensibilité peut être corrigé en introduisant un facteur de correction. Ce facteur se calcule en traçant le graphique qui correspond à la différence entre les valeurs obtenues par simulation numérique et celles obtenues par simulation analytique, comme indiqué sur la Figure VI.25.

La Figure VI.25 présente la différence entre les valeurs réelles et les valeurs calculées, pour plusieurs valeurs de perméabilité.

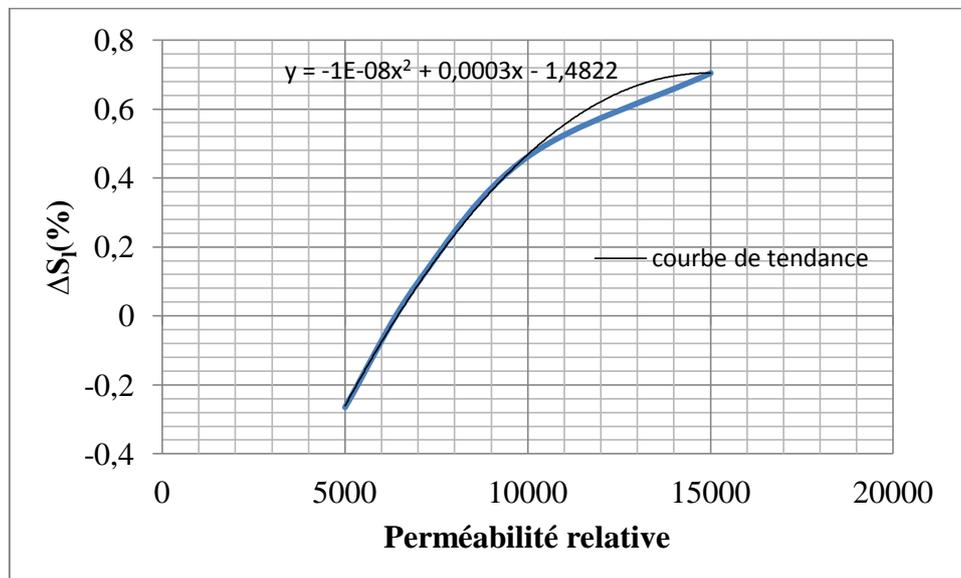


Figure VI.25: Calibrage du modèle analytique

Le graphique qui décrit l'influence de la perméabilité est estimé par la fonction logarithmique suivante :

$$\Delta S_l = 10^{-8} \mu_r^2 + 0.0003 \mu_r - 1.4822 \quad (\text{VI.54})$$

L'expression de la sensibilité en tenant compte la valeur de calibrage ΔS_l s'écrit :

$$S_l = S_{l_0} + 1e - 8 \mu_r^2 + 0.0003 \mu_r - 1.4822 \quad (\text{VI.55})$$

Sachant que S_{l_0} correspond à la valeur de la sensibilité trouvée par calcul analytique sans tenir compte l'influence de la perméabilité du matériau du châssis.

VI.5 Validation expérimentale du modèle de la sensibilité

Une maquette à échelle réduite a été fabriquée (voir Figure VI.26). L'objectif est de reproduire les mêmes valeurs obtenues par simulation analytique et numérique. La maquette contient un fil enroulé en plusieurs tours sous forme d'une boucle rectangulaire de dimension (29×26) cm². La boucle est collée sur une plaque en bois. Un générateur basse fréquence (GBF) est utilisé pour alimenter la boucle rectangulaire par un courant de valeur et de

CHAPITRE 2

fréquence constant. Une plaque métallique de petite épaisseur ($e < 1$) émule le châssis du véhicule. Pour la lecture des graphes et des valeurs nous avons utilisés un Oscilloscope.

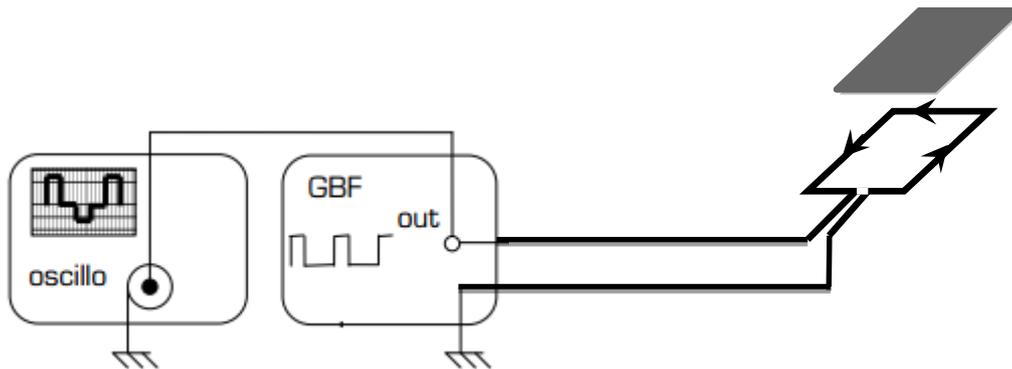


Figure VI.26: Schéma du banc d'essai

Le système GBF-boucle électromagnétique est modélisé par l'équation suivante :

$$V = (r + jL\omega)I \quad (\text{VI.56})$$

Sachant que :

V, r, L et I représentent la tension à la sortie du GBF, la résistance, l'inductance de la boucle et le courant traversant la boucle simultanément.

En appliquant une tension de 1,69 V à 90 kHz sur les bornes de la boucle, nous avons obtenu les résultats suivants :

$V(V)$	$I(A)$	$f(kHz)$	$r(\Omega)$	$n(tours)$
1.59	0.1	90	1.4	5

Tableau VI.9: Relevés expérimentaux 1

La valeur de l'inductance mesurée correspond à $29,78 \mu H$. Cette valeur est proche de la valeur trouvée par calcul analytique ($27,84 \mu H$).

En mettant la plaque métallique sur une hauteur de 1 cm de la boucle, les valeurs trouvées précédemment varient. Le Tableau VI.10 présente les nouvelles valeurs trouvées :

$V(V)$	$I(A)$	$f(kHz)$	$r(\Omega)$	$n(tours)$
2.2	0.1	90	1.4	5

Tableau VI.10: Relevés expérimentaux 2

L'utilisation d'un GBF permet de fixer la valeur de la fréquence. Par contre, la variation de l'inductance propre de la boucle se traduit par une variation de la tension. Après calcul en utilisant la formule (VI.56), nous avons constaté que cette variation se traduit par une

CHAPITRE 2

variation de l'inductance propre de la boucle. La valeur de l'inductance en présence de la plaque est égale à $38.82 \mu H$.

La sensibilité de la boucle en présence de la plaque métallique se calcule comme suit :

$$S_l = \frac{38.82 - 29.78}{29.78} = 30\%$$

Cette valeur est proche de la valeur obtenue par simulation analytique ($S_l = 34.62\%$).

La petite différence entre la valeur mesurée et calculée peut être justifiée par la précision inférieure des matériels utilisés pendant cette expérience et aussi par le non pris en compte de l'inductance de queue de la boucle rectangulaire.

VI.6 Évaluation du modèle de la sensibilité

Afin d'évaluer les valeurs essentielles de la sensibilité obtenues par les approches de modélisation proposées, nous proposons la manipulation suivante :

D'abord, on colle la boucle électromagnétique sur le sol d'une route isolée. Ensuite, nous traçons sur cette route les points de passage du véhicule qui correspondent à un demi-recouvrement (50 %) (Voir Tableau VI.11) et à un recouvrement complet (100 %) (Voir Tableau VI.11). En fin, on fait passer le véhicule sur les points référés et on mesure la variation de fréquence détectée à l'aide d'un détecteur électronique.

Le système de détection se résume en une boucle électromagnétique, d'une queue, d'un regard et d'un câble de liaison raccordé à l'oscillateur électronique comme illustré sur la Figure VI.27.

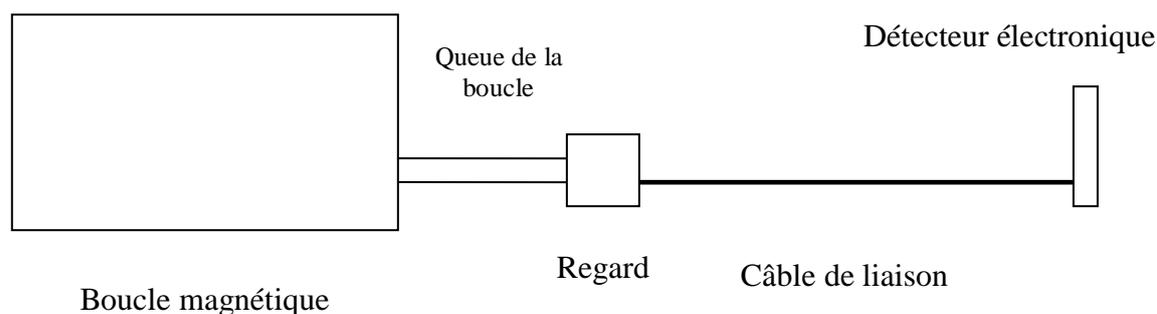


Figure VI.27: Système de détection à base d'une boucle électromagnétique de forme rectangulaire

La boucle électromagnétique est parcourue par un courant sinusoïdal, implanté dans le sol et raccordé via un câble de liaison au détecteur. Le raccordement de la boucle au câble de liaison s'effectue dans un regard situé à proximité immédiate de la boucle au moyen d'une connexion étanche.

La variation de la sensibilité de la boucle sera référée par une variation de fréquence au niveau du détecteur électronique.

Afin de valider le modèle de la sensibilité, nous nous sommes référés aux essais expérimentaux effectués par CEREMA-Ile-de-France. Pour cette étude, les éléments suivant ont été utilisés :

CHAPITRE 2

- un VL : Renault Clio de largeur extrémités pneus de 1,5m, de garde au sol 14 cm, d'empattement 2,5 m et de longueur 3,6 m
- une boucle SEREDO de dimensions (2, 1.5) m²
- une route de largeur 3.5 m

Pour la simulation, les mêmes éléments ont été utilisés. Cela est nécessaire pour reproduire les mêmes mesures. Le schéma du principe ainsi que les résultats trouvés sont donnés dans le Tableau VI.11 :

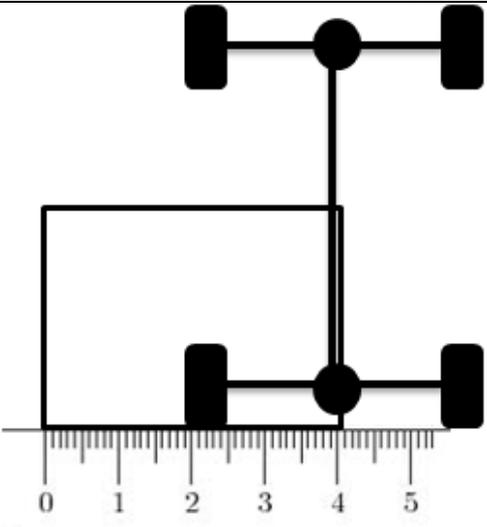
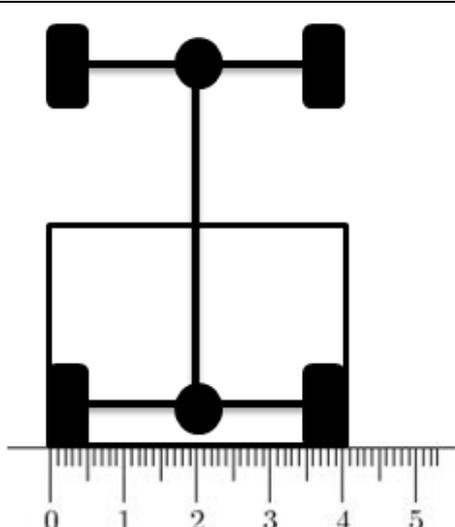
Recouvrement= 50 % (a)	Recouvrement= 100 % (c)
	
$\frac{\Delta f}{f_{sans}} = 0.86$	$\frac{\Delta f}{f_{sans}} = 3.49$

Tableau VI.11: Valeurs mesurées pour deux recouvrements

La modélisation électronique présentée dans la première annexe montre qu'une variation de fréquence détectée par le détecteur WIMIX est liée à la sensibilité par la relation suivante :

$$\frac{\Delta f}{f_{sans}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L_{sans}} = \frac{1}{2} S_{boucle} \quad (\text{VI.57})$$

Il suffit de multiplier le rapport $\frac{\Delta f}{f_{sans}}$ par 2 pour avoir la valeur de la sensibilité engendrée au niveau de la boucle électromagnétique.

Recouvrement = 50 %	Recouvrement = 100 %
$S_{boucle} = 1,72 \%$	$S_{boucle} = 6,98 \%$

Tableau VI.12: sensibilités mesurées pour deux recouvrements

Les valeurs sont très proches aux valeurs trouvées par les modèles développées. Les points qui correspondent à 50 % de recouvrement et à 100 % de recouvrement sont très essentiels dans les algorithmes développés. Le premier point a été utilisé pour établir le seuil de détection et le deuxième point pour calculer la sensibilité maximale d'une boucle.

VI.7 Synthèse

Dans ce chapitre nous avons présenté des modèles qui décrivent les différentes interactions qui ont lieu sur une chaussée entre les boucles magnétiques et les véhicules. La maîtrise de ces différentes interactions conduit au dimensionnement du capteur magnétique. Les modèles analytiques développés ont été validés par un outil de simulation numérique FLUX3D et expérimentalement par un banc d'essai à échelle réduite et sur un site contrôlé. Nous avons également présenté une démarche qui permet de tenir compte de la variation de quelques paramètres, supposés constant, dans les modèles déjà développés.

L'étude comparative entre la boucle rectangulaire et circulaire montre que la boucle rectangulaire offre une distribution de champ magnétique plus uniforme que la boucle circulaire. De même, la sensibilité entre boucles adjacentes de forme rectangulaire est presque nulle en tenant compte une petite distance de séparation, contrairement aux boucles de forme circulaire.

VII. CHAPITRE 3

Approches de la modélisation analytique d'un câble piézoélectrique en interaction avec les roues des véhicules

Résumé :

Le présent chapitre concerne l'étude des chocs produits par les roues de véhicules roulant sur un câble piézo-électrique. L'objectif est de développer des modèles qui décrivent la réaction du câble face au choc subis. Cette réaction se résume en une tension qui se génère entre les électrodes placées sur les deux faces du câble. Deux modèles sont présentés dans ce chapitre.

VII.1 Introduction

Un câble piézoélectrique de forme plate a été choisi pour faire l'objet d'un travail de modélisation électromécanique. Cette forme est adoptée par plusieurs constructeurs dont le fabricant du « câble BL » [54]. Ce dernier est caractérisé par sa bonne précision, une caractéristique qui le différencie des autres câbles de forme coaxiale. L'élément principal d'un tel câble est le matériau piézoélectrique. C'est ce matériau qui réagit au choc des roues en produisant une tension en sortie.

Dans ce chapitre, nous allons détailler les principaux types de matériaux piézoélectriques, les effets existants dans un matériau piézoélectrique ainsi que les différents types de déformations existantes. La connaissance de ces caractéristiques est indispensable pour établir des modèles qui décrivent la réaction du câble piézoélectrique face au choc engendré par le passage d'une roue. Nous allons ensuite présenter les deux modèles électromécaniques développés. Ils reproduisent la tension générée par le câble piézoélectrique qui subit un choc par une roue. Le premier modèle unidirectionnel suppose l'existence d'une onde longitudinale unidirectionnelle créée par la force exercée sur une face supérieure du câble. Cette onde, qui résulte de la déformation dans le matériau, donne naissance à une tension qui se génère entre les deux électrodes. Le deuxième modèle se base sur le développement analytique des équations de la piézoélectricité. Dans la suite de ce travail nous utiliserons les modèles développés pour caractériser le choc engendré par chaque type de véhicule afin d'optimiser le système de détection.

VII.2 Matériau piézoélectrique

Certains matériaux possèdent la particularité de se polariser électriquement sous l'effet d'une contrainte mécanique, c'est l'effet direct de la piézoélectricité. Inversement, le même matériau se déforme lorsqu'il est soumis à une différence de potentielle, c'est l'effet inverse de la piézoélectricité [55]. Cette propriété trouve un très grand nombre d'applications dans l'industrie et la vie quotidienne. Ces applications peuvent être classées en trois grandes familles : les applications de puissance, de signal et d'allumage [56].

VII.2.1 Types de matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques sont très nombreux. Ils sont classés en quatre classes principales qui sont, les cristaux, les céramiques, les polymères et les composites [57] [55]. Certains cristaux possèdent une piézo-électricité naturelle [58]. Les céramiques, les polymères et les composites doivent être polarisés pour acquérir la propriété piézoélectrique [57]. Les différents types de matériaux piézoélectriques se différencient surtout par leurs constantes d'élasticité, piézoélectricité et le coefficient de couplage électromécanique [59]. Les coefficients de couplage électromécanique sont généralement notés k_{ij} [60]. Ils sont compris en 0 et 1 et peuvent être vus comme une sorte de rendement. Ils traduisent la faculté d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie mécanique qu'il reçoit en énergie électrique et inversement. Récemment des recherches ont conduit au développement de monocristaux de type PMN-PT qui possède des coefficients de couplage de l'ordre de 94% [61].

VII.2.1.1 Cristaux (Quartz par exemple)

Un milieu cristallin est composé de particules chargées. Dans un cristal, la piézoélectricité naît du décalage des barycentres des charges positives et négatives de la maille cristalline provoqué par la déformation mécanique de cette maille (voir Figure VII.1. b) [57] [62]. De ce

CHAPITRE 3

fait la propriété de la piézoélectricité est fortement liée à la symétrie de la maille sachant qu'une maille « centrosymétrique » (c'est-à-dire qui possède un centre de symétrie) ne peut donner lieu à un cristal piézoélectrique (voir Figure VII.1. a) [62].

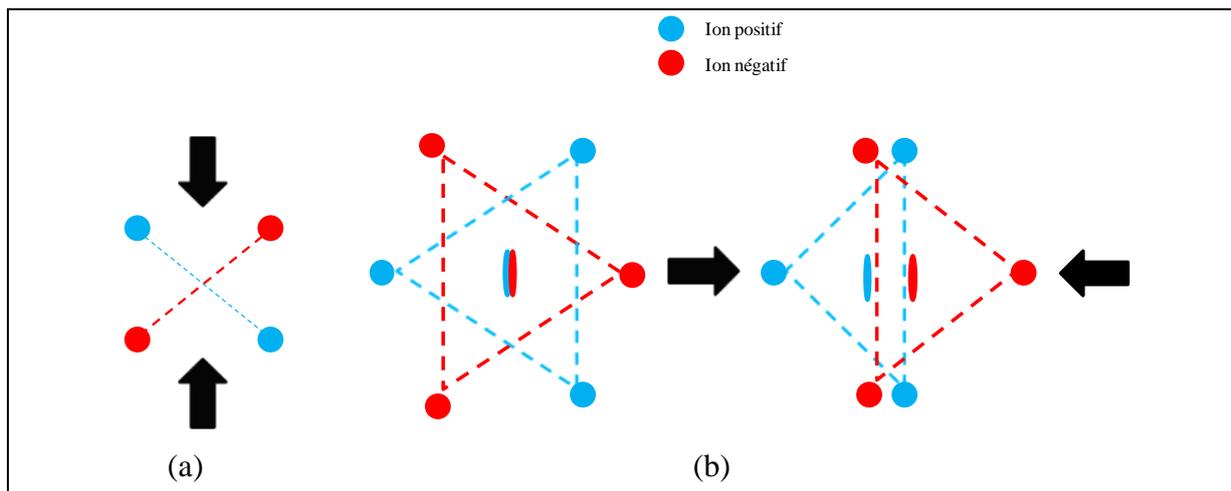


Figure VII.1: Apparition de la piézoélectricité dans un cristal (a) cristal centrosymétrique, (b) cristal non centrosymétrique

Sur les 32 classes cristallines, il en existe 21 non centrosymétriques, dont 20 sont piézoélectriques et dont 10 possèdent une polarisation électrique en l'absence de champ électrique appliqué et sont dites pyroélectriques (leurs moments dipolaires étant sensibles à la température) [60]. Parmi les cristaux pyroélectriques, nous distinguons les cristaux ferroélectriques. La Figure VII.2 présente un organigramme des cristaux piézoélectriques.

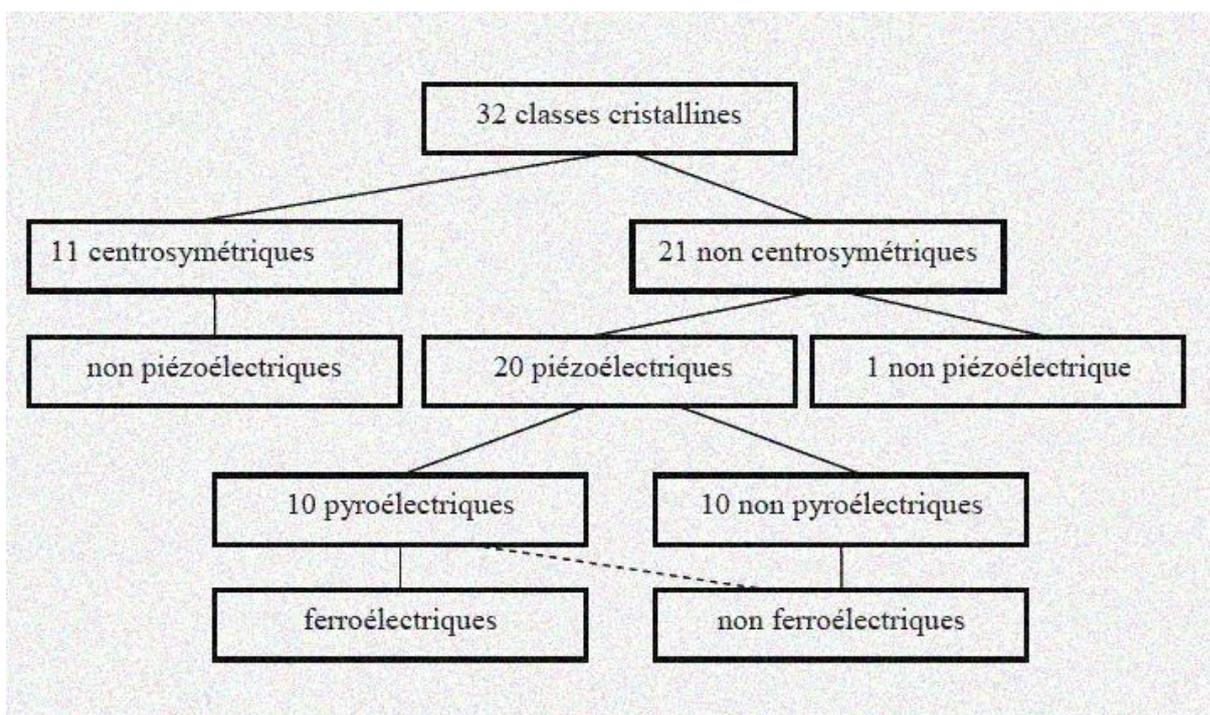


Figure VII.2: Classes des cristaux [57]

VII.2.1.2 Céramiques

À la différence des cristaux qui possèdent une piézoélectricité naturelle, les céramiques ne sont pas naturellement piézoélectriques, ils le deviennent après polarisation. Deux types de polarisations sont possible, une polarisation à chaud ou à froid. La polarisation à chaud consiste à chauffer le matériau au voisinage de la température de Curie puis à appliquer un champ électrique élevé. La polarisation à froid nécessite un champ électrique très élevé. La polarisation reste conserver quand le champ appliqué est ramené à zéro, c'est la polarisation rémanente. Les PZT (Titano-Zirconate de Plomb) sont les céramiques piézoélectriques les mieux adaptés à l'heure actuelle, principalement en raison de leur propriétés piézoélectriques. Une cellule élémentaire est représentée sur la Figure VII.3. La cellule du gauche est polarisée tandis que celle à droite n'est pas polarisée. Le champ électrique appliqué sur la cellule à droite fait que l'ion Ti^{4+} quitte le centre de la maille (effet piézoélectrique) [57] [58] [55].

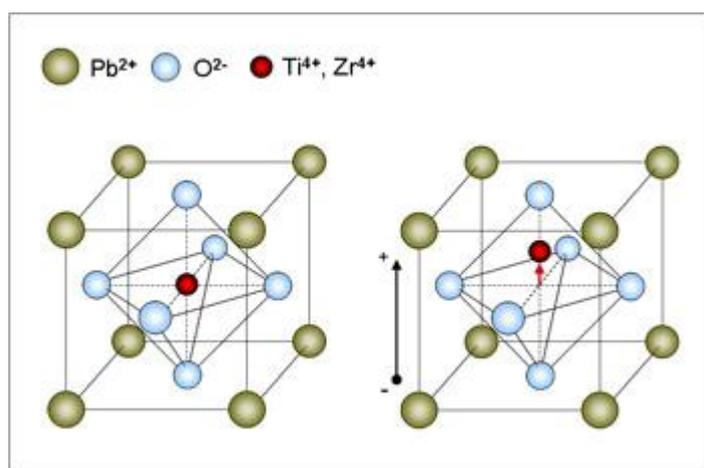


Figure VII.3: Cellule PZT [57]

D'autres céramiques existent, ces céramiques se distinguent par différentes caractéristiques (champ coercitif, constante diélectrique, coefficient de couplage électromécanique plus ou moins fort etc.).

VII.2.1.3 Polymères

Un polymère est une substance thermoplastique composée de macromolécules dont le monomère principal qui se répète est le CH_2CF_2 (voir Figure VII.4). Les macromolécules organiques peuvent résulter de processus biologiques (polymères naturels) ou bien être préparées à l'aide de réactions chimiques (polymères synthétiques) [63].

Pour que les polymères acquièrent des propriétés piézoélectriques ils se sont soumettent, lors leur fabrication, à un champ électrique. Cette phase de polarisation permet de créer les deux pôles électriques.

La Figure VII.4 présente une structure du PVDF (PolyVynilDiFluorure) dans deux conformations différentes. On remarque bien que dans la conformation présentée à droite les atomes d'hydrogène (H) se trouvent sur un côté tandis que les atomes de fluor se trouvent sur l'autre côté. Cet alignement dû à l'application du champ électrique permet de rendre le polymère piézoélectrique.

CHAPITRE 3

Les polymères se caractérisent par une faible impédance acoustique [64]. Cette propriété caractérise la résistance d'un milieu au passage du son. Elle est définie comme étant le rapport entre la pression acoustique et la vitesse v de déplacement des particules dans le milieu. Cette caractéristique fait que les polymères sont donc supérieurs sur ce point de vue. Cependant jusqu'à une période récente, leurs coefficients de couplage étaient bien plus faibles que ceux des céramiques [64]. L'amélioration des procédés de fabrication et plus particulièrement ceux des copolymères a abouti à des valeurs de k_{ij} de l'ordre de la moitié de ceux obtenus avec des céramiques. À titre d'exemple, les transducteurs à base de copolymères ont aujourd'hui des performances qui s'approchent de celles des capteurs à céramiques.

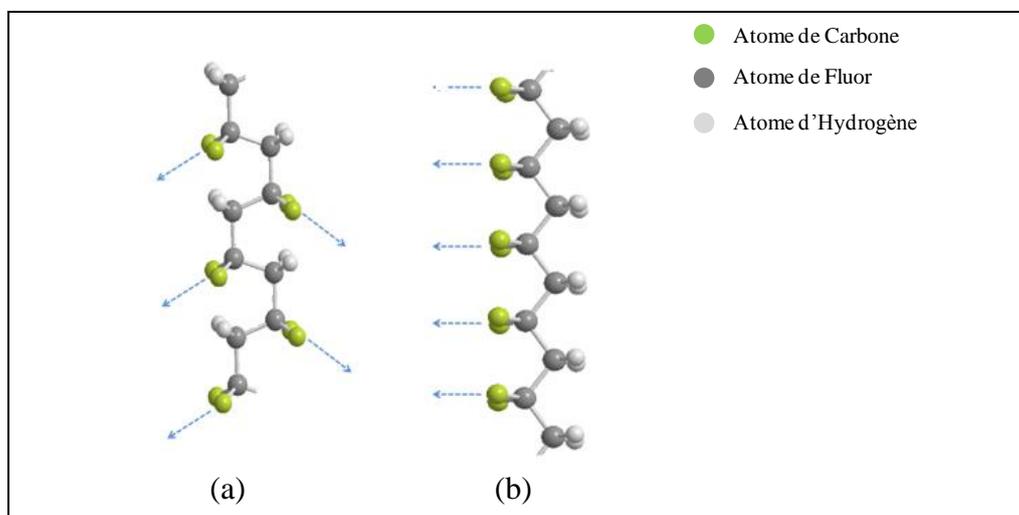


Figure VII.4: Structure d'un polymère (a) conformation non polarisée, (b) conformation polarisée [57]

VII.2.1.4 Composites

Les matériaux composites, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 1980 et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézoélectriques [57] [55], depuis l'apparition des (Titano-Zirconate de Plomb) PZT dans les années 1960 [65]. Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n'avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et un coefficient de couplage k_t élevé [65]. En effet, les céramiques souffrent d'une impédance acoustique trop élevée et les polymères d'une valeur de k_{ij} trop faible. L'idée était donc qu'il fallait utiliser à la fois une céramique à k_{ij} élevé, associée à un matériau passif de faible impédance acoustique de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un k_{ij} comparable avec celui d'une céramique [57].

De nombreux types de composites ont été développés. Des études théoriques confirmées par des mesures ont montré que la valeur du k_{ij} pouvant être égale, voire supérieure à celle de la céramique seule, avec une impédance acoustique deux à trois fois plus faible [57] [62] [59].

VII.2.2 Effets qui peuvent exister dans un matériau piézoélectrique

Dans un matériau piézoélectrique placé dans un environnement spécifique, plusieurs effets peuvent se présenter. Ces effets sont à la fois dûs à la nature du matériau, et à aussi à l'environnement où se situe le matériau. Les principaux effets sont au nombre de trois. Il arrive qu'un seul effet soit dominant sur les deux autres. C'est le cas dans cette étude.

- **Effet thermoélectrique**

La thermoélectricité résulte d'un phénomène appelé la pyroélectricité, du grec pyro qui signifie feu, est le phénomène de polarisation dû à un échange d'énergie entre le matériau et l'environnement extérieur. Cette polarisation est proportionnelle à la variation de température et son signe dépend du sens de cet échange (échauffement ou refroidissement).

- **Effet thermo-élastique**

La thermo-élasticité se définit par le phénomène de déformation du matériau dû à un échange d'énergie entre le matériau et l'environnement extérieur. Cet effet traduit le couplage entre les grandeurs thermiques et élastiques [66].

- **Effet électromécanique**

Le couplage entre les grandeurs électriques et mécaniques, définit un phénomène qui s'appelle la piézoélectricité.

Le matériau piézoélectrique est un matériau diélectrique susceptible à se polariser électriquement sous une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique. La polarisation du matériau est nommée l'effet direct et la déformation s'appelle l'effet indirect. On distingue dans ce genre de matériau deux polarisations. Une est due à la nature diélectrique du matériau et l'autre est due à la contrainte mécanique. Les deux polarisations auront comme effets de générer deux champs électriques dont un est dominant sur l'autre.

Après avoir présenté les différents comportements qui décrivent un matériau piézoélectrique, nous pouvons conclure que dans un matériau piézoélectrique non cristallin les effets thermoélectrique et thermo-élastique sont négligeables. En effet, la petite variation de la température n'influe pas considérablement sur la morphologie du matériau.

Nous présentons sur la Figure VII.5 un diagramme qui résume le couplage électromécanique existant entre les grandeurs électriques et mécaniques dans un matériau piézoélectrique.

Les grandeurs qui décrivent ce couplage sont : la contrainte mécanique $T(N.m^{-2})$, le champ électrique $E(V.m^{-1})$, la déformation $S(m)$ et le déplacement électrique $D(C.m^{-2})$. Ces grandeurs sont reliées par différents paramètres : élastique s , piézoélectrique d et diélectrique ξ . Pour relier d'autres grandeurs différentes, la piézoélectricité se traduit par une modification des paramètres utilisés.

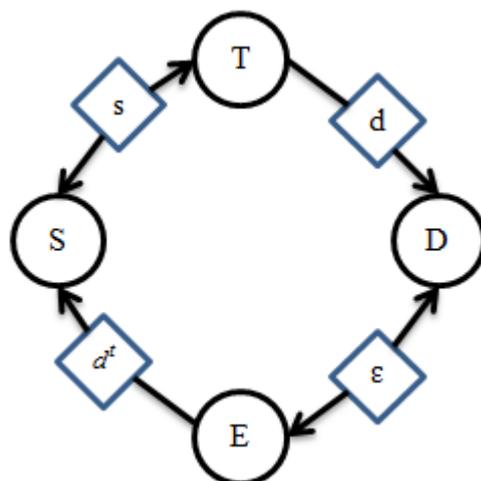


Figure VII.5: Couplage électromécanique dans un matériau piézoélectrique

VII.2.3 Types de déformations dans un matériau piézoélectrique

Afin de modéliser la réaction du câble piézoélectrique face au choc subis par la roue, nous devons aussi définir le type de déformation qui peut avoir lieu dans le câble étudié. Les systèmes piézoélectriques sont fabriqués de façon précise pour privilégier un mode de déformation considéré. La littérature montre que pour favoriser un mode de vibration ou de déformation, on doit gérer quelques facteurs qui sont : la forme du système, ces dimensions, sa polarisation et l'emplacement des électrodes sur les faces du système. En connaissant le mode de déformation, il est possible de proposer un modèle analytique convenable de ce mode de vibration.

Les propriétés piézoélectriques sont décrites par un système normalisé de symboles et de notations. D'une manière générale, un échantillon piézoélectrique est référencé par un trièdre (O, x_1 , x_2 , x_3). Par convention, la direction et le sens de la polarisation sont confondus avec l'axe 3 ou (Oz) [67]. Les modes de couplage sont définis par deux chiffres, le premier correspond à la direction du champ électrique et le second à la direction de la contrainte mécanique. Les différentes directions dans un matériau piézoélectrique sont présentées sur la Figure VII.6 .

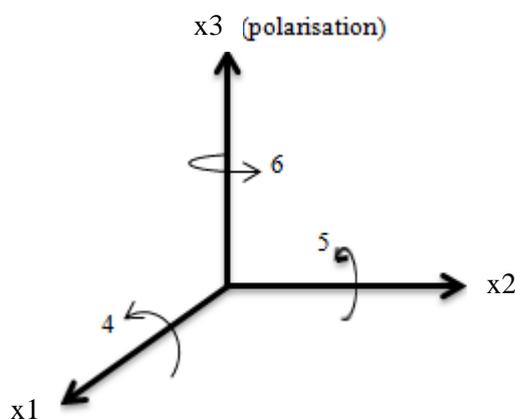


Figure VII.6: Directions de déformation dans un matériau piézoélectrique

CHAPITRE 3

Trois modes de déformation distincts sont obtenus ; Ils sont présentés ci-dessous [68] [57] [67].

VII.2.3.1 Mode longitudinal (mode 33)

Dans le mode longitudinal la contrainte mécanique ainsi que le champ électrique ont la même direction. Ce mode possède un bon coefficient de couplage, cependant le placement des électrodes sur les surfaces vibrantes les fragilise. La déformation a lieu dans toutes les directions mais elle est maximale selon l'axe 3.

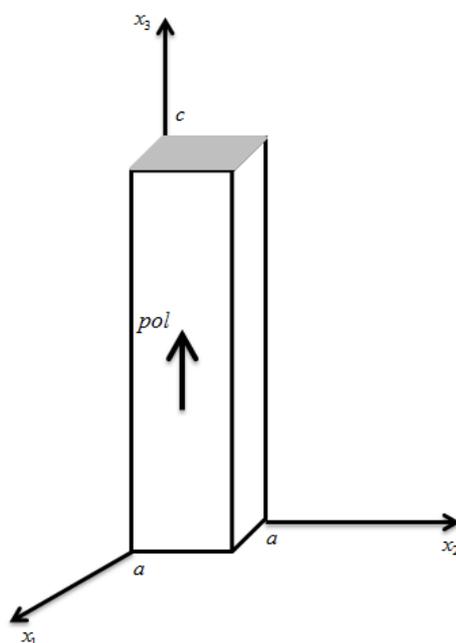


Figure VII.7: Échantillon caractérisé par une déformation longitudinale

VII.2.3.2 Mode transversal (mode 31 ou 32)

Le mode transversale se traduit par l'application d'une contrainte perpendiculaire à l'axe du champ électrique. Dans ce mode, les électrodes ne sont pas placées sur les surfaces subissant la contrainte, donc offrant l'avantage de ne pas soumettre les électrodes à la contrainte. En revanche, il possède un coefficient de couplage moindre que le mode longitudinal.

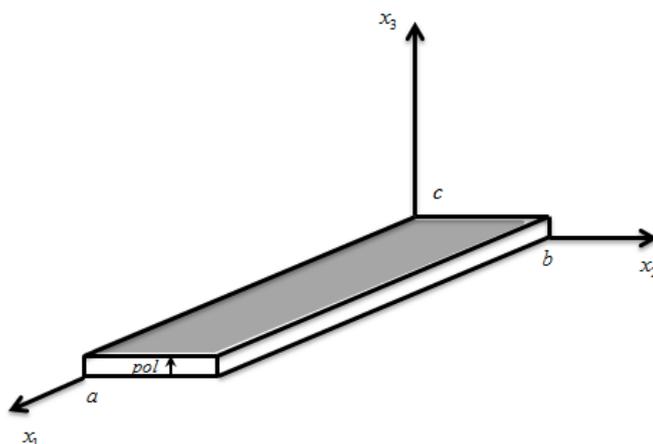


Figure VII.8: Échantillon caractérisé par une déformation transversale

CHAPITRE 3

VII.2.3.3 Mode cisaillement (ex : mode 15)

Le mode de cisaillement est engendré par une disposition particulière des électrodes. Pour avoir les contraintes de cisaillement ou T_5 non nulles, les deux électrodes doivent être placées de telle sorte que champ électrique soit perpendiculaire à la polarisation du matériau. Des déformations selon l'axe 5 apparaissent. La substance subit alors un phénomène de torsion autour de l'axe choisi.

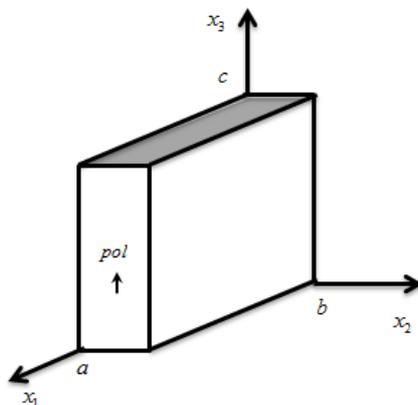


Figure VII.9: Mode de cisaillement dans un échantillon

VII.2.3.4 Mode épaisseur (mode 33)

Le mode épaisseur présente des caractéristiques similaires au mode longitudinal. La direction de polarisation est parallèle à la direction du champ électrique engendré par les deux électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure de la plaque. Néanmoins, les contraintes mécaniques perpendiculaires à l'axe 3 ne sont pas nulles, ce qui différencie ce mode du mode longitudinal.

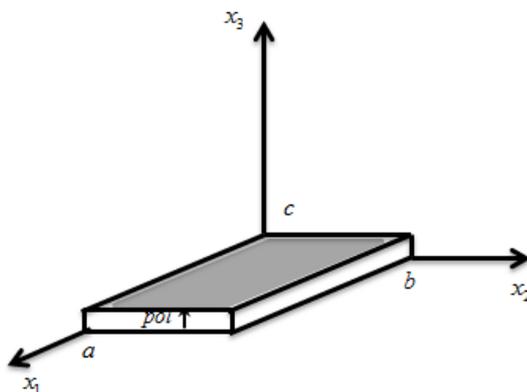


Figure VII.10: Mode épaisseur caractérisant un échantillon

Nous avons présenté les différents types de déformations qui peuvent exister dans un matériau piézoélectrique de forme parallélogramme. Le mode provoqué, quand le matériau est soumis à une contrainte électrique, dépend de la forme de l'échantillon et de la disposition des électrodes.

Dans le cas présent, les électrodes sont placées sur la face inférieure et extérieure du câble, dans la direction de polarisation du matériau. Le mode de cisaillement ne peut donc pas avoir

lieu. De plus le câble est soumis à une contrainte mécanique parallèle à la direction du champ électrique, ce qui privilégie le mode de propagation longitudinal dans le câble.

VII.2.4 Coefficients caractérisant chaque type de déformation

Le coefficient de couplage électromécanique caractérise l'aptitude du matériau piézoélectrique à convertir de façon réciproque l'énergie mécanique en énergie électrique [69]. Il est défini de manière générale par la relation suivante :

$$k = \frac{U_{Mut}}{\sqrt{U_{Elec} U_{mec}}} \quad (\text{VII.1})$$

Sachant que :

U_{Mut} Correspond à l'énergie mutuelle qui est égale à $\frac{1}{2} s^E T^2$

U_{Elec} Correspond à l'énergie électrique qui est égale à $\frac{1}{2} EdT$

U_{mec} Correspond à l'énergie mécanique qui est égale à $\frac{1}{2} \xi^T E^2$

En exploitant les expressions des énergies mécanique, électrique et mutuelle, nous pouvons définir pour chaque type de déformation le coefficient de couplage adéquat. Ainsi, les différents coefficients sont les suivant :

- Coefficient de couplage en mode épaisseur

$$k_t = \frac{-h_{33}}{\sqrt{c_{33}^D \beta_{33}^S}}$$

- Coefficient de couplage en mode transversal

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{11}^E \xi_{33}^T}}$$

- Coefficient de couplage en mode longitudinal

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^E \xi_{33}^T}}$$

La valeur des différents coefficients indique le type de déformation qu'on peut provoquer et aussi le pourcentage la conversion de l'énergie électromécanique dans le mode provoqué [69].

VII.2.5 Équations fondamentales de la piézoélectricité

En négligeant l'influence de la température (effet thermoélectrique et thermoélastique), les différentes grandeurs qui décrivent le phénomène piézoélectrique peuvent être regroupées dans quatre équations de couples indépendants.

CHAPITRE 3

- Couple indépendant (S et D)

$$\begin{cases} S = s^E T + d^t E \\ D = dT + \zeta^T E \end{cases} \quad (\text{VII.2})$$

La première équation relie la déformation S à la contrainte mécanique T et au champ électrique E où :

- Le terme $s^E T$ traduit l'élasticité du matériau.
- Le terme $d^t E$ traduit l'effet piézoélectrique inverse.

La deuxième équation relie l'induction électrique D à la contrainte mécanique T et à au champ électrique E où :

- Le premier terme traduit l'effet piézoélectrique direct du matériau.
- Le deuxième terme traduit le type diélectrique du matériau.

Différentes constantes relient les différentes variables. On définit :

- s^E (6×6) (Pa^{-1} ou $m^2 N^{-1}$) : la matrice des souplesses mesurées à champ électrique constant ou nul.
- d^t (CN^{-1} Ou mV^{-1}) : transposé de la matrice des constantes piézoélectrique (3×6)
- ζ^T (Fm^{-1}) : la matrice des primitives (3×3) mesurées à contrainte mécanique nulle ou constante

Les trois autres équations sont obtenues en manipulant l'équation principale (VII.2), et en utilisant d'autres coefficients.

- Couple indépendant (T et D)

$$\begin{cases} T = c^E S - e^t E \\ D = eS + \zeta^S E \end{cases} \quad (\text{VII.3})$$

- Couple indépendant (S et E)

$$\begin{cases} S = s^D T + g^t D \\ E = -gT + \beta^T D \end{cases} \quad (\text{VII.4})$$

- Couple indépendant (T et E)

$$\begin{cases} T = c^D S - h^t D \\ E = -hS + \beta^S D \end{cases} \quad (\text{VII.5})$$

On définit ainsi trois catégories de matrices utilisées :

CHAPITRE 3

Catégorie 1 : les matrices élastiques

c^D (Nm^{-2}) : Matrice des rigidités mesurées à induction constantes

c^E (Nm^{-2}) : Matrice des rigidités mesurées à champs électrique constants ou nul

Catégorie 2 : les matrices électriques

ξ^S (Fm^{-1}) : Matrice des permittivités mesurées à déformation constantes ou nulles

β^S (mF^{-1}) : Matrice des constantes d'imperméabilité (inverses des permittivités) mesurées à déplacement constant

Catégorie 3 : les matrices piézoélectriques

e ($NV^{-1}m^{-1}$ Ou Cm^{-2}) : Matrice des constantes piézoélectriques

h (NC^{-1} Ou Vm^{-1}) : Matrice des constantes piézoélectriques

d^t (CN^{-1} Ou mV^{-1}) : Transposé de la matrice des constantes piézoélectriques

VII.3 Système étudié

Le système étudié est constitué d'un câble piézoélectrique et d'une roue de véhicule. L'objectif est de modéliser l'interaction qui se reproduit entre une roue de véhicule et le câble piézoélectrique.

Le choix s'est porté sur un câble piézoélectrique de type « BL ». Ce câble de forme plate possède deux électrodes qui sont placées sur la face supérieure et inférieure du câble. Ces deux électrodes recouvrent totalement les deux faces du câble. L'ensemble est protégé par une coque en aluminium [54] [70](voir Figure VII.11).

Le matériau piézoélectrique constituant le câble est considéré de type polymère ou céramique. Rappelons que l'effet thermo-électrique et thermo-élastique dans ces matériaux est négligeable. Ce matériau est polarisé selon l'axe 3.



Figure VII.11: Constitution du câble piézo-électrique de type BL

Le câble piézo-électrique peut être soumis simultanément à un ou plusieurs chocs. Les différents scénarios qui peuvent être reproduits et qui caractérisent l'interaction entre les roues et le câble sont regroupés dans le Tableau VII.1.

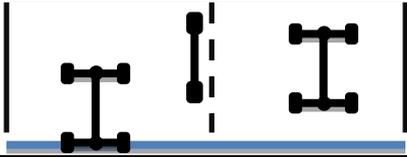
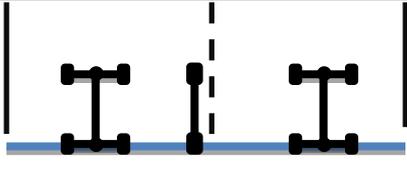
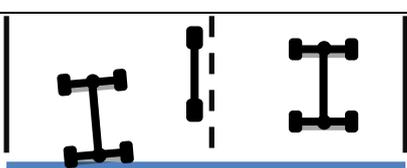
	<p>Les deux roues avant du véhicule traversent le câble en même temps.</p>
	<p>Plusieurs véhicules traversent le câble piézo-électrique simultanément.</p>
	<p>Une seule roue traverse le câble piézo-électrique.</p>

Tableau VII.1: Scénarios câble-roues

La force exercée par la roue sur le câble de forme plate possède trois composantes, une latérale selon l'axe y , l'autre horizontale selon l'axe x et la troisième verticale selon l'axe z . Les effets de la composante verticale est dominant sur les effets des autres composantes. Les effets de la composante horizontale et latérale seront donc considérés comme nuls. L'étude se résume en une seule roue en interaction avec un câble piézoélectrique dont la composante dominante de la force est le poids. La Figure VII.12 présente le profil de la composante verticale F_z de l'instant de début de l'interaction jusqu'à l'instant de fin de l'interaction. À l'instant t_{pic} , la composante F_z atteint son maximum.

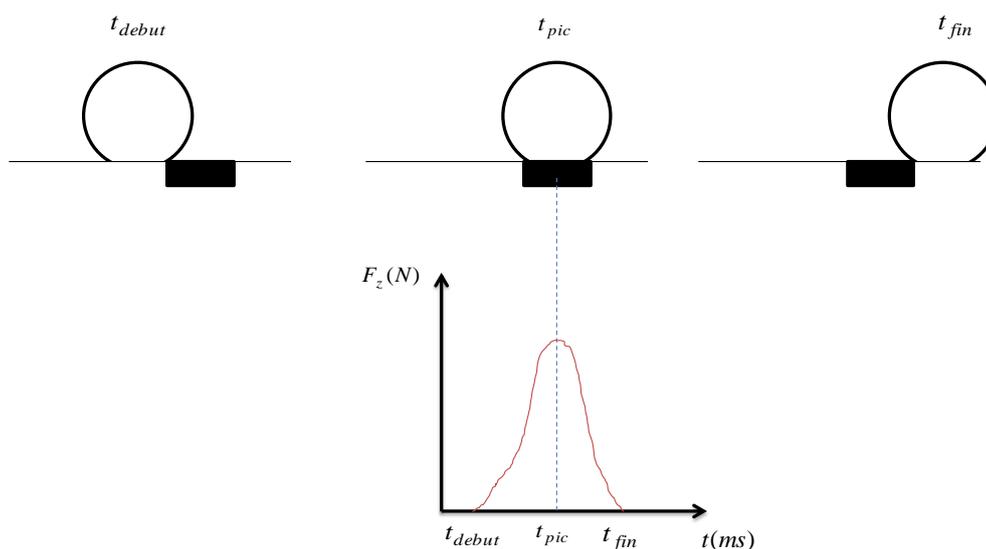


Figure VII.12: Instants de présence et allure de force d'une roue qui se présente au-dessus d'un câble piézoélectrique

VII.4 Modélisation de l'interaction « roue-câble piézoélectrique »

Nous présentons ci-dessous deux approches de modélisations de l'interaction d'une roue d'un véhicule avec un câble piézoélectrique de forme plate (voir Figure VII.13). L'objectif principal est de simuler la tension générée par ce câble.

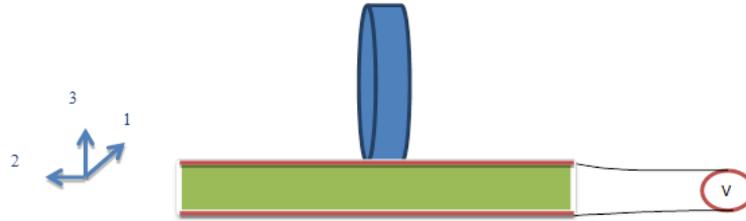


Figure VII.13: Une roue en interaction avec un câble piézoélectrique

VII.4.1 Premier modèle

La première approche développée se base sur un modèle qui fait appel à une analyse unidimensionnelle de la piézoélectricité et un découplage du comportement du câble. En effet, elle suppose la propagation d'une onde unidirectionnelle le long du câble [67]. De même, le câble piézoélectrique réagit aux chocs par deux comportements différents : un comportement élastique et un comportement piézoélectrique [67].

Nous avons développé pour chaque comportement un modèle puis nous les avons regroupés en un seul qui représente le comportement réel du câble. Ces deux comportements sont bien associés dans l'équation (VII.16).

VII.4.1.1 Hypothèse

Lorsqu'une roue traverse le câble, ce dernier se déforme dans les trois directions. Cette déformation se caractérise par trois ondes qui se propagent le long des trois axes. C'est l'onde qui se propage selon la direction de polarisation qui a un effet dominant sur les autres ondes.

Dans cette étude, on considère que le capteur est rigidement soutenu, la contrainte mécanique verticale appliquée va donc avoir tendance à comprimer le film c'est-à-dire à agir selon l'axe 3.

Le matériau constituant le câble est considéré isotrope. On peut donc parler d'ondes de type quasi-longitudinal car la vibration des particules qui a lieu suivant une direction faisant un angle non nul avec le vecteur d'onde, n'auront pas lieu.

Vu l'emplacement des électrodes sur les faces inférieure et supérieure du câble, nous avons considérés que l'émigration des particules chargés ne se fait que selon l'axe 3. Cela produira deux dipôles électriques macroscopiques au niveau des deux électrodes.

VII.4.1.2 Modèle du comportement élastique

La contrainte mécanique s'applique selon l'axe 3 et génère une onde plane longitudinale dans la direction 3 négative.

CHAPITRE 3

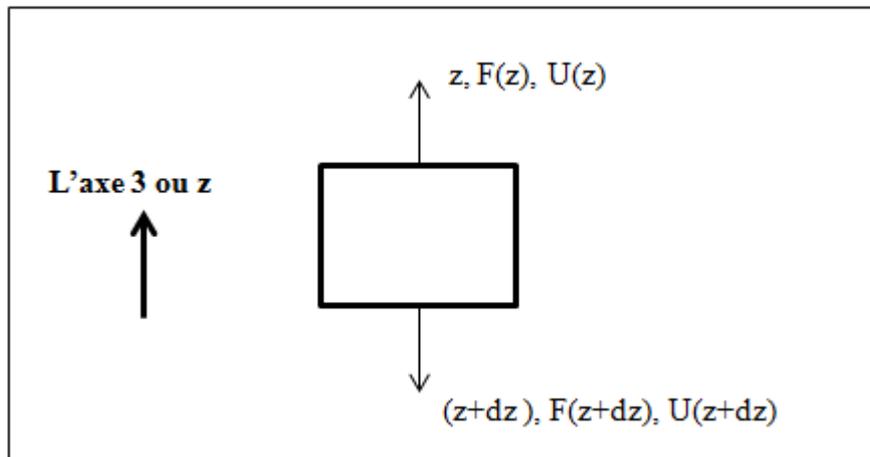


Figure VII.14: Portion de câble subite la déformation

Notons u l'onde unidirectionnelle qui se propage selon la direction 3. Le principe fondamental de la dynamique appliqué sur un échantillon de matériau illustre que :

$$\sum \vec{F} = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{VII.6})$$

Sachant que m représente la masse de la portion, \vec{F} la force exercée sur la masse m

En développant l'expression (VII.6) pour la portion située entre z et $z + dz$ (voir Figure VII.14), on aura :

$$F(z + dz) - F(z) = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{VII.7})$$

En dérivée partielle, l'expression (VII.7) s'écrit :

$$\frac{dF(z)}{dz} dz = \rho \times Surf \times dz \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{VII.8})$$

Après simplification :

$$\frac{d^2 F(z)}{dz^2} = \rho \times Surf \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{VII.9})$$

Un matériau soumis à une force F s'allonge d'une longueur dl . La constante de proportionnalité de cette relation, qui reflète la « rigidité » de la matière, est évaluée E . Ceci est le module d'Young du matériau [71]. « Surf » est la section du matériau. Par conséquent :

$$F = E \times Surf \times \frac{dl}{l} \quad (\text{VII.10})$$

En remplaçant l'expression (VII.10) dans l'expression (VII.9), on trouve :

CHAPITRE 3

$$\frac{d^2 u}{dz^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (\text{VII.11})$$

L'étude se limite aux phénomènes harmoniques et périodiques. La solution est considérée comme un produit de deux fonctions, une dépend du temps tandis que l'autre dépend de la position. D'où la solution s'écrit sous la forme suivante :

$$u(z, t) = u(z) e^{j\omega t} \quad (\text{VII.12})$$

$$u(z) = \alpha e^{-jkz} + \beta e^{jkz} \quad (\text{VII.13})$$

$u(z, t)$ représente la solution de l'équation (VII.13). Les constantes α et β sont déterminées en utilisant les conditions aux limites suivantes :

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_0$$

$$\dot{u}(l) = \dot{u}_l$$

$$F(0) = F_0$$

$$F(l) = F_l$$

$$k = \frac{\omega}{c}$$

La force qui s'exerce sur un échantillon m du matériau à l'abscisse z à un instant t donné est exprimée par l'expression suivante :

$$F(z, t) = Surf \times E \times \frac{j e^{j\omega t}}{\sin(kl)} \times (\dot{u}_0 \cos(k(z-l)) - \dot{u}_l \cos(kz)) \quad (\text{VII.14})$$

Le modèle élastique qui traduit le comportement élastique du câble piézoélectrique est décrit ci-dessous:

$$\begin{cases} \dot{u}_0 = j \left(\frac{F_l}{Z \sin(kl)} - \frac{F_0 \cos(kl)}{Z \operatorname{tg}(kl)} \right) \\ \dot{u}_l = \frac{j}{Z} \left(\frac{F_l}{\operatorname{tg}(kl)} - F_0 \frac{\cos(kl)}{\operatorname{tg}(kl)} - F_0 \sin(kl) \right) \end{cases} \quad (\text{VII.15})$$

VII.4.1.3 Modèle du comportement piézoélectrique

L'équation qui décrit le couplage électromécanique (ou le comportement piézoélectrique) est donnée par (VII.16) :

$$E = -hS + \beta^S D \quad (\text{VII.16})$$

CHAPITRE 3

Cette équation montre l'existence d'une cogénération entre la contrainte mécanique et le champ électrique. La contrainte mécanique génère une onde qui se propage dans le câble. Cette onde, qui représente le déplacement des particules, crée un champ électrique qui développe lui-même la contrainte mécanique.

Le matériau est isotrope, donc on peut écrire :

$$D = \xi E \quad (\text{VII.17})$$

$$\beta^s = \frac{1}{\zeta^s} \quad (\text{VII.18})$$

De (VII.16) on a :

$$E = \frac{D}{\zeta^s} - hS \quad (\text{VII.19})$$

La tension générée entre les deux électrodes se calcule comme suit :

$$V = \int Edz \quad (\text{VII.20})$$

En remplaçant (VII.19) dans (VII.20), l'expression de la tension devient :

$$V = \frac{Dl}{\zeta^s} - h(U(l) - U(0)) \quad (\text{VII.21})$$

Le déplacement électrique est considéré comme uniforme et il ne dépend pas de la position, par conséquent :

$$D(z,t) = D_0 e^{j\omega t} \quad (\text{VII.22})$$

D'où le courant électrique qui est donné comme suit :

$$I = \text{Surf} \times j\omega D$$

L'expression de la tension générée devient :

$$V = \frac{Il}{j\omega \times \text{surf} \times \zeta^s} - \frac{h}{j\omega} (\dot{U}(l) - \dot{U}(0)) \quad (\text{VII.23})$$

Le comportement piézoélectrique du câble est exprimé par l'expression (VII.23). La tension générée dépend de l'onde longitudinale qui se propage dans le câble sous l'effet de la déformation engendrée par la contrainte mécanique.

La valeur du courant électrique tend vers zéro quand le câble est raccordé au conditionneur électronique caractérisé par une impédance de valeur importante.

La force générée par la tension existante entre les deux électrodes (effet de la piézoélectricité inverse) se calcule comme suit :

$$F = -h\Sigma D = -h \times surf \times \frac{jw \times surf \times \xi^S}{l} V + \frac{h \times surf \times \xi^S}{l} (\dot{U}(l) - \dot{U}(0)) \quad (VII.24)$$

Les modèles développés montrent l'existence de deux forces :

- Une développée par la contrainte mécanique (la force exercée par la roue sur le câble)
- La deuxième se développe par la tension qui se génère entre les deux électrodes (effet piézoélectrique inverse)

VII.4.1.4 Model Matlab Simulink

Les équations (VII.15), (VII.23) et (VII.24) sont simulées sous Matlab Simulink. Nous avons eu comme résultat le modèle présenté par Figure VII.15.

F_+ et F_- , représentent simultanément la force exercée par la roue et la force de réaction du sol.

U_+ et U_- , deux ondes longitudinales se propagent dans deux sens différents parallèlement à l'axe 3.

F , représente la force générée par la tension existante entre les deux électrodes.

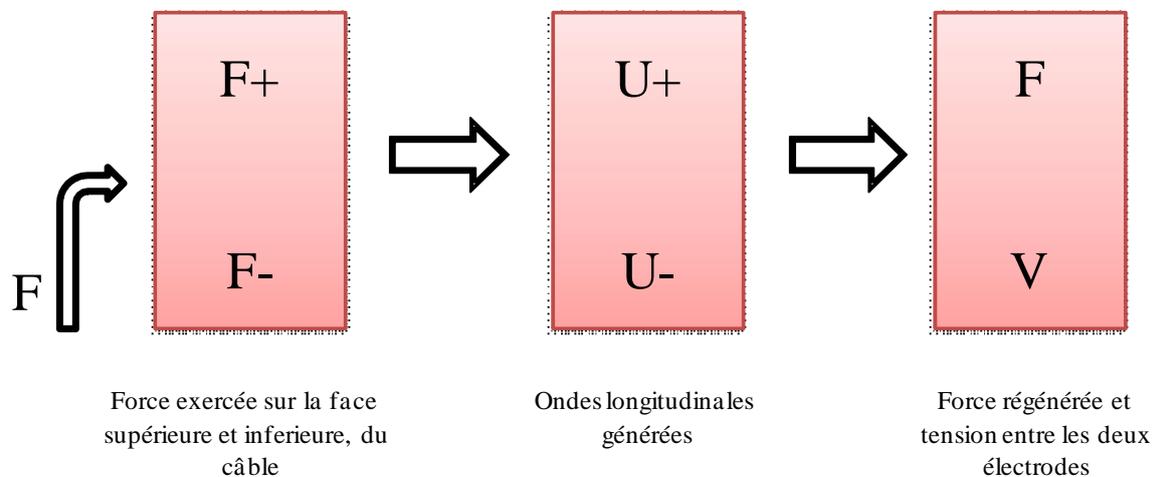


Figure VII.15: Modèle Simulink d'un câble piézoélectrique

VII.4.2 Deuxième modèle

La deuxième approche constitue en quelque sorte une analyse de la piézoélectricité qui se base sur les équations matricielle établies pour les matériaux piézoélectriques. Ces équations regroupent les différents comportements existants dans ce genre de matériau.

En négligeant l'influence de la pyroélectricité, l'équation matricielle de la piézoélectricité s'écrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} S = s^E T + d^t E \\ D = dT + \xi^T E \end{cases} \quad (VII.25)$$

CHAPITRE 3

VII.4.2.1 Conditions aux limites

La face supérieure du câble piézoélectrique est soumise à une pression pour chaque présence d'une roue au-dessus du câble. Par contre, les autres faces sont libres d'où :

$$T_1 = T_2 = 0 \quad T_3 \neq 0 \quad (\text{VII.26})$$

Les contraintes de cisaillement sont nulles, d'où :

$$T_4 = T_5 = T_6 = 0 \quad (\text{VII.27})$$

Les électrodes sont placées sur la face inférieure et supérieure du câble, de telle sorte que la localisation de la déformation sur le câble n'a aucune influence, d'où :

$$E_1 = E_2 = 0 \quad E_3 \neq 0 \quad (\text{VII.28})$$

Du fait que les contraintes de cisaillements et les composantes E_1 et E_2 du champ électriques sont nulles, les déformations en cisaillements correspondantes seront également nulles, soit :

$$S_4 = S_5 = S_6 = 0 \quad (\text{VII.29})$$

Les conditions existantes favorisent le mode de déformation longitudinal (mode 33). On est conduit à réduire la relation de comportement pour ne faire apparaître que les grandeurs mécaniques selon l'axe 3 et les grandeurs électriques dans la direction de polarisation.

VII.4.2.2 Équations mécaniques

En écriture matricielle et en tenant comptes les conditions liées au mode de déformation et le type de matériau (céramique [57] ou polymère [63]), l'équation (VII.25) se simplifie à :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} & 0 & 0 & 0 \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} & 0 & 0 & 0 \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{VII.30})$$

En éliminant les produits nuls :

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{13} \\ 0 & 0 & d_{23} \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (\text{VII.31})$$

Finalement, on obtient les équations des déplacements selon les trois axes :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= s_{13}T_3 + d_{13}E_3 \\
 S_2 &= s_{23}T_3 + d_{23}E_3 \\
 S_3 &= s_{33}T_3 + d_{33}E_3
 \end{aligned}
 \tag{VII.32}$$

Nous remarquons bien que les déplacements dépendent du champ électrique E_3 , de la contrainte mécanique appliquée selon l'axe 3 et des paramètres élastiques et piézoélectriques, du câble.

VII.4.2.3 Équations électriques

En écriture matricielle et en tenant comptes des conditions liées au mode de déformation, l'équation (VII.25.2) se simplifie à :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} T_3 + \begin{bmatrix} \zeta_{11} & \zeta_{12} & \zeta_{13} \\ \zeta_{21} & \zeta_{22} & \zeta_{23} \\ \zeta_{31} & \zeta_{32} & \zeta_{33} \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{bmatrix}
 \tag{VII.33}$$

En éliminant les produits nuls :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{11} & \xi_{12} & \xi_{13} \\ \xi_{21} & \xi_{22} & \xi_{23} \\ \xi_{31} & \xi_{32} & \xi_{33} \end{bmatrix}' \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ E_3 \end{bmatrix}
 \tag{VII.34}$$

De même, l'équation de l'induction électrique se réduit à :

$$D_3 = d_{33}T_3 + \xi_{33}E_3
 \tag{VII.35}$$

VII.4.2.4 Équation globale

La contrainte mécanique est équivalente à une pression qui s'applique dans le sens de l'axe 3 négatif :

$$T_3 = -p
 \tag{VII.36}$$

Les équations mécaniques (VII.32) et électriques (VII.35) qui décrivent la déformation du câble sont les suivantes:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= -s_{13}p + d_{13}E_3 \\
 S_2 &= -s_{23}p + d_{23}E_3 \\
 S_3 &= -s_{33}p + d_{33}E_3
 \end{aligned}
 \tag{VII.37}$$

CHAPITRE 3

$$D_3 = -d_{31}p + \xi_{33}E_3 \quad (\text{VII.38})$$

La charge électrique est conservée. Par conséquent, l'expression de l'induction électrique est donnée par :

$$D_3 = D_0 e^{j\omega t} \quad (\text{VII.39})$$

Le courant électrique se calcule comme suit :

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{\Sigma dD}{dt} \quad (\text{VII.40})$$

D'où :

$$D_3 = \frac{I}{j\omega ab} = -d_{33}p + \xi_{33}E_3 \quad (\text{VII.41})$$

En reportant l'expression de l'induction électrique dans (VII.38), l'expression du champ électrique devient :

$$E_3 = \frac{I}{j\omega ab \xi_{33}} + \frac{d_{33}}{\xi_{33}} p \quad (\text{VII.42})$$

La tension électrique se calcule en intégrant l'expression du champ électrique :

$$V = \frac{-cI}{j\omega ab \xi_{33}} - \frac{cd_{33}}{\xi_{33}} p \quad (\text{VII.43})$$

Les expressions des déformations deviennent :

$$\begin{aligned} S_2 &= -s_{13}p + d_{13} \frac{I}{j\omega ab \xi_{33}} + d_{13} \frac{d_{33}}{\xi_{33}} p \\ S_2 &= -s_{23}p + d_{23} \frac{I}{j\omega ab \xi_{33}} + d_{23} \frac{d_{33}}{\xi_{33}} p \\ S_3 &= -s_{33}p + d_{33} \frac{I}{j\omega ab \xi_{33}} + d_{33} \frac{d_{33}}{\xi_{33}} p \end{aligned} \quad (\text{VII.44})$$

À vide (cas où l'impédance du conditionneur électronique est très grande), l'expression de la tension devient :

$$V = \frac{cd_{33}}{\xi_{33}} \frac{F}{surf} \quad (\text{VII.45})$$

Les expressions des déformations deviennent :

$$\begin{aligned}
 S_1 &= (-s_{13} + d_{13} \frac{d_{33}}{\xi_{33}}) p \\
 S_2 &= (-s_{23} + d_{23} \frac{d_{33}}{\xi_{33}}) p \\
 S_3 &= (-s_{33} + d_{33} \frac{d_{33}}{\xi_{33}}) p
 \end{aligned}
 \tag{VII.46}$$

VII.5 Résultats de simulation

Les résultats de simulation des deux modèles développés sont donnés dans la Figure VII.16. Le système étudié regroupe une roue de véhicule qui supporte un poids de 560 kg et un câble piézoélectrique de forme plate de dimensions (6 m, 0,05 m, 0,005 m). Le matériau piézoélectrique considéré est de type céramique. La Figure VII.16 présente la tension générée par le câble piézoélectrique obtenue par simulation. La courbe bleue correspond au résultat obtenu par le premier modèle unidirectionnel. La courbe verte correspond au résultat obtenu par le deuxième modèle basé sur les équations matricielle de la piézoélectricité. Nous remarquons que les deux allures des deux chocs se rapprochent ce qui montre la validité des deux modèles. La légère différence d'amplitude entre les deux courbes est due aux hypothèses différentes considérées dans les deux modèles.

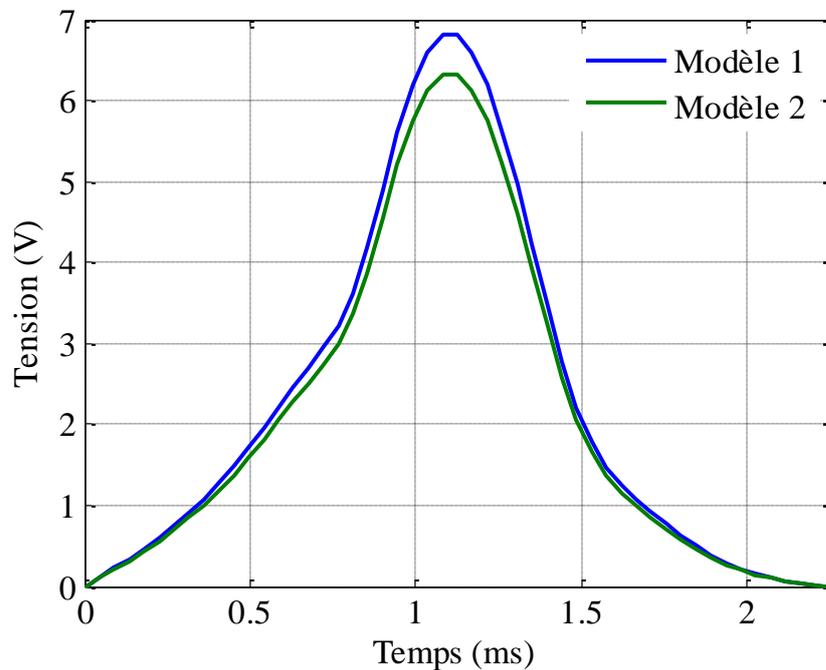


Figure VII.16: Exemple d'un signal de tension généré par un câble piézo-électrique, soumis à une force ($m = 560$ kg)

Les paramètres du câble BL fournis par le fabricant nous ont permis de valider le deuxième modèle simulé. Nous présentons dans le Tableau VII.2 les données du câble récupérées du fabricant ainsi que les différents résultats. Ces résultats montrent que la valeur de la tension obtenue par simulation est cohérente avec la valeur de la tension récupérée du fabricant.

CHAPITRE 3

Type de matériau piézoélectrique	Pression exercée sur le câble (N/m ²)	Épaisseur du matériau piézoélectrique constituant le câble (µm)	Tension générée (V) : donnée fabricant	Tension générée (V) : Valeur calculée
PVDF	10000	110	0.373	0.372

Tableau VII.2: Tension électrique générée (simulation et expérimentale)

VII.6 Synthèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux modèles électromécaniques qui décrivent un choc piézoélectrique. Chacun des deux modèles est basé sur des hypothèses simplificatrices. Les résultats issus des deux modèles ainsi que ceux récupérés du fabricant sont cohérents, ce qui montre la validité des deux modèles électromécaniques. Le dépassement en amplitude remarqué sur l'allure obtenue par la simulation du modèle unidirectionnel peut être confiné en considérant un seuil adéquat pour chaque type de véhicule.

Dans la suite de ce travail, nous utiliserons les deux modèles électromécaniques pour simuler les chocs piézoélectriques produits par différents types de véhicules. La distinction entre les différentes catégories de véhicules peut se faire en connaissant la grandeur d'amplitude de chaque type de véhicule.

VIII. CHAPITRE 4

Approche de dimensionnement du capteur hybride et méthodes de caractérisation du trafic

Résumé :

Nous présentons dans ce chapitre une approche de dimensionnement et de traitement des données issues du capteur hybride. Cette approche se base sur les résultats des modèles électromagnétiques et électromécaniques développés dans les chapitres 2 et 3, et qui décrivent simultanément l'interaction entre les châssis et les boucles enterrées dans le sol, et l'interaction entre les roues de véhicules et le câble piézoélectrique. Elle conduit à différentes configurations pour différents types de routes. Le nombre des boucles et des câbles ainsi que leurs dimensions dépend à la fois des objectifs visés, des caractéristiques des routes ainsi que de celles des véhicules.

VIII.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre une approche de dimensionnement et une méthode de traitement des données d'un capteur de trafic. Pour le dimensionnement, nous nous sommes basés sur les modèles développés dans les chapitres 2 et 3. La méthode de traitement qui sera présentée permet la caractérisation du trafic qui se définit par l'opération de détection d'une ou de plusieurs variables. Ces variables permettront d'alimenter des statistiques relatives à la circulation des véhicules pour analyser leur comportement. Nous pourrions ainsi répondre aux objectifs du projet METRAMOTO qui concernent la mobilité, l'exploitation de la route et la sécurité routière relatives aux 2RM.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter les différentes variables caractérisant l'état du trafic. Ensuite, nous présenterons une démarche générale conduisant au dimensionnement du capteur de trafic hybride sélectif en se basant sur les modèles développés dans les chapitres trois et quatre. Cette démarche sera appliquée pour dimensionner un capteur pour une route à deux voies. Parallèlement, nous présentons des méthodes de traitement des données issues des boucles et des câbles.

VIII.2 Variables du trafic

Le trafic routier résulte de la circulation des différents véhicules avec différents comportements. Sa caractérisation se définit en analysant plusieurs paramètres ou variables qui sont :

VIII.2.1 Le débit

Il se définit comme étant le nombre de véhicules traversant la zone recouverte par le capteur, pendant une séquence de temps qui peut être mesurée en heures ou en jours. La connaissance du débit d'une route aide à suivre l'état du trafic, qui peut être soit ralenti ou normal. Cette donnée permet par exemple aux usagers du réseau routier d'éviter les embouteillages. De même pour les autorités, il est considéré comme un élément principal permettant d'apporter des améliorations sur une infrastructure routière.

VIII.2.2 La concentration

C'est le nombre de véhicules existant sur une portion longitudinale de la route à un instant donné. Plus le trafic est concentré plus il est ralenti.

VIII.2.3 Types de véhicules

La distinction des PL ainsi que des 2RM constitue actuellement une nécessité majeure. La connaissance du pourcentage des PL circulant sur une route sert à évaluer la dégradation subit sur cette route. Par ailleurs, le pourcentage des 2RM sur une route permet de prendre des précautions de sécurité plus fermes.

La discrimination entre les types existants des véhicules peut se faire en connaissant :

- La longueur du véhicule
- Le nombre des essieux
- La distance entre les essieux
- Le poids des essieux
- La hauteur des véhicules
- etc...

VIII.2.4 Le temps d'occupation

C'est le temps de présence d'un véhicule sur la zone occupée par le capteur. Il est limité par deux instants, le temps d'arrivée de la perturbation et le temps de fin de la perturbation. Le temps de présence dépend de la longueur de la zone sensible du véhicule, de la vitesse des véhicules et de leurs longueurs. Un grand temps de présence caractérise les trafics ralentis.

VIII.2.5 La vitesse moyenne

La vitesse moyenne d'un véhicule permet de suivre le comportement des conducteurs sur certaines portions sensibles de la route. Ce paramètre peut amener à apporter des modifications au niveau des réglementations ou des infrastructures dans le but d'augmenter la sécurité routière. La connaissance de la vitesse des différentes catégories de véhicules nous permet d'identifier les usagers les plus dangereux sur la route.

VIII.2.6 Emplacement sur la chaussée

L'emplacement d'un véhicule sur la chaussée se mesure par sa position latérale. Cette mesure indispensable définit le comportement des usagers, surtout les 2RM. Les statistiques faites sur des routes très fréquentées par les 2RM montrent que ces derniers se positionnent fréquemment en inter-files pour effectuer des dépassements dangereux.

VIII.2.7 Distance longitudinale entre véhicules

La distance entre deux véhicules se définit comme étant la distance longitudinale entre l'arrière du premier véhicule et l'avant du deuxième. Pour l'estimer, nous nous basons sur les instants de détection ainsi que sur quelques dimensions du véhicule. La mesure de cette distance donne une idée sur l'état de sécurité d'une route, ce qui peut être utilisé pour rappeler aux usagers la nécessité de respecter les distances de sécurité, surtout si les conditions météorologiques sont dégradées.

VIII.2.8 Détection des incidents et des embouteillages

La détection des événements offre un gain de temps et d'argent pour les usagers. Plusieurs paramètres de trafic peuvent être utilisés pour détecter les incidents sur les routes.

VIII.3 Dimensionnement du capteur hybride

Pour n'importe quelle route qui appartient au réseau routier Français, les dimensions des boucles électromagnétiques ainsi que celles du câble piézoélectrique sont présentés ci-dessous :

VIII.3.1 Forme des boucles électromagnétiques

L'étude comparative entre la boucle rectangulaire et circulaire montre que :

- la boucle rectangulaire offre une distribution de champ magnétique plus uniforme que la boucle circulaire
- la détection des véhicules qui disposent d'un châssis de hauteur qui varie entre 20 et 30 Cm, est assurée par la boucle rectangulaire sur toute la chaussée vu l'uniformité du champ sur cet intervalle de hauteurs

- La sensibilité entre boucles adjacentes de forme rectangulaire est presque nulle en tenant compte une petite distance de séparation, contrairement aux boucles de forme circulaire
- L'enfouissement d'une boucle de forme rectangulaire est plus facile que l'enfouissement d'une boucle de forme circulaire. cette dernière nécessite un matériel particulier

À ces raisons, le choix a été porté sur une boucle de forme rectangulaire.

VIII.3.2 Dimensionnement des boucles électromagnétiques

La boucle rectangulaire choisie dispose d'une largeur de 1,75 m et d'une longueur de 1,5 m.

Ce choix permet d'assurer la validité de l'hypothèse décrite dans le deuxième chapitre qui prévoit que le châssis peut être modélisé par une boucle rectangulaire court-circuitée de mêmes dimensions que la boucle rectangulaire enterrée dans la chaussée. En effet, la valeur 1,75 m correspond à la plus petite largeur de véhicule, et la valeur 1,5 m correspond à la plus petite longueur de la partie centrale du châssis.

Ce choix a été fait aussi pour déclencher la détection à partir d'un recouvrement de 50 % en considérant un seuil convenable (voir paragraphe V.3.5).

L'étude effectuée dans le premier chapitre montre que la largeur de la voie n'est jamais supérieure à 3,5 m. En considérant cette largeur et en supposant que le véhicule reste sur la voie, la boucle ne sera jamais recouverte à moins de 50 %. La détection reste ainsi assurée.

Pour les voies qui disposent d'une largeur inférieure à 3,5 m, le recouvrement sera supérieur à 50 % et la détection sera assurée.

VIII.3.3 Emplacement des boucles électromagnétiques

Il y a deux choses à prendre en compte pour l'emplacement latérale des boucles sur la chaussée :

Une distance entre boucles qui permet d'annuler les fausses détections en gardant la sensibilité entre boucles inférieure au seuil de détection.

Un recouvrement qui doit engendrer une sensibilité supérieure au seuil de détection.

Concernant l'enterrement des boucles électromagnétiques, l'étude en cours considère une profondeur d'enterrement nul. En réalité, cette distance dépende des contraintes de génie civil.

VIII.3.4 Dimensionnement du câble piézoélectrique

Le choix porte sur l'utilisation d'un câble incliné d'un angle α qui s'étend sur la largeur de la chaussée afin que tous les véhicules, les 2RM inclus, soient détectés. Les bords droit et gauche de la chaussée ne sont pas recouverts sur une distance de 50 cm car aucune roue d'un véhicule, qui roule à une vitesse supérieure à 50 km/h ne peut se présenter sur cette zone, en tenant compte de la largeur des rétroviseurs. Ce choix permet de réduire le coût du câble piézoélectrique.

VIII.3.5 Choix du seuil de détection

Le seuil de détection correspond à la valeur minimale de déclenchement de la détection. En dessous de cette valeur, le compteur du détecteur n'est pas incrémenté. Le seuil de détection est fixé à 1 %. Cette valeur qui correspond à la plus petite valeur de sensibilité engendrée par un VL, est établie par la prise en compte d'un VL dont les dimensions sont les plus petites possibles. Ce seuil permet d'éliminer la détection des 2RM dont la variation de sensibilité reste inférieure à 1%. Le réglage choisi a plusieurs objectifs :

Il doit détecter par les boucles tous les véhicules excepté les 2RM. Cela implique :

- Un réglage du seuil de détection pour éliminer les perturbations magnétiques dues au détecteur électronique et les câbles de transmissions
- Un réglage du seuil de détection pour ne pas tenir compte les fausses détections engendrées par les boucles adjacentes
- Un réglage du seuil de détection pour ne pas tenir compte du passage des 2RM

Il doit également détecter tous les types de véhicules par le câble piézoélectrique avec un réglage du seuil du câble pour éliminer les perturbations de mesure.

VIII.4 Méthodes d'identifications de véhicules

Les données fournies par le câble et les boucles seront traitées par des algorithmes pour identifier les différents types de véhicules. Nous présentons dans cette section la méthode suivie pour identifier les différentes catégories de véhicules : PL, VU, VL et les 2RM.

VIII.4.1 Identification de véhicules par les boucles électromagnétiques

Nous nous sommes basés sur la forme de la signature ainsi que de son amplitude pour identifier le type de véhicule. En effet, les VL disposent d'un châssis de faible hauteur ($H_{moy} = 121\text{ mm}$) en les comparant avec les VU ($H_{moy} = 181\text{ mm}$). Donc, les VL se caractérisent par une signature d'amplitude plus grande que celle des VU. Par contre la signature des VU est plus étendue du fait de la longueur du châssis. Il en est de même pour les PL. La Figure VIII.1 représente la signature de deux véhicules qui roulent à 130 km/h :

Le véhicule 1 (VL) : garde au sol = 121 mm, empattement = 1,5 m.

Le véhicule 2 (VU) : garde de sol = 181 mm, empattement = 5 m.

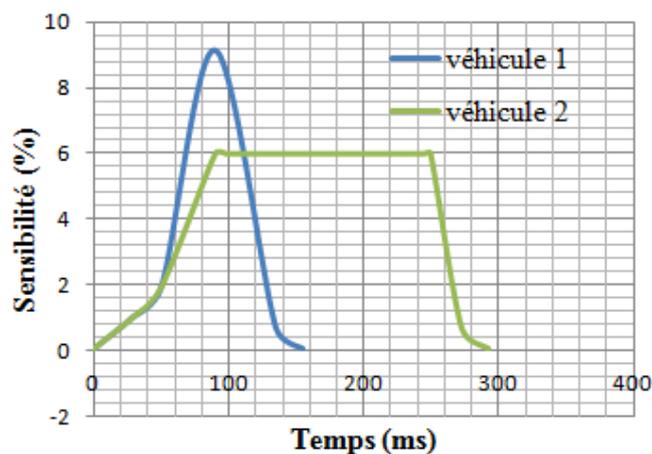


Figure VIII.1: Signature d'un VL et d'un VU

CHAPITRE 4

Le temps de présence d'un véhicule sur une boucle est calculé en connaissant l'instant de début de la perturbation et l'instant de fin de la perturbation. Il dépend de la longueur du véhicule qui traverse la boucle et de sa vitesse.

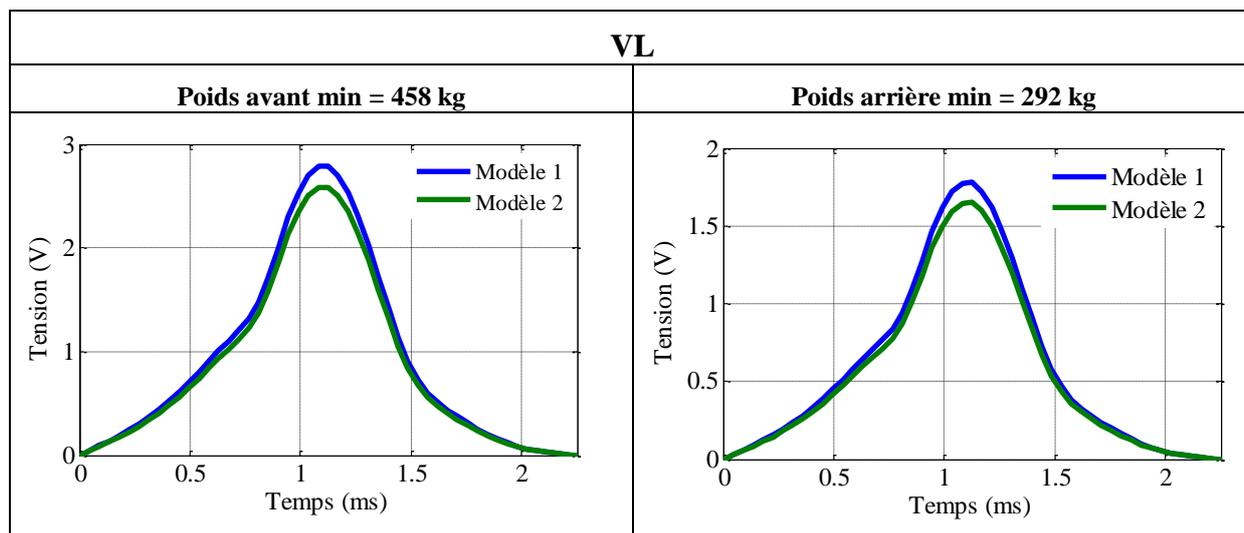
Le Tableau VIII.1 indique les temps de présence en millisecondes de quelques véhicules, pour différentes vitesses en utilisant une boucle de longueur 1,5 m.

Longueur de véhicule (m)	Vitesse (km/h)				
	30 km/h	50 km/h	70 km/h	90 km/h	110 km/h
2,5	480	288	205,7	160	130,9
4,815	757,8	454,6	324,8	252,6	206,7
4,073	668,7	401,2	286,6	222,9	182,4

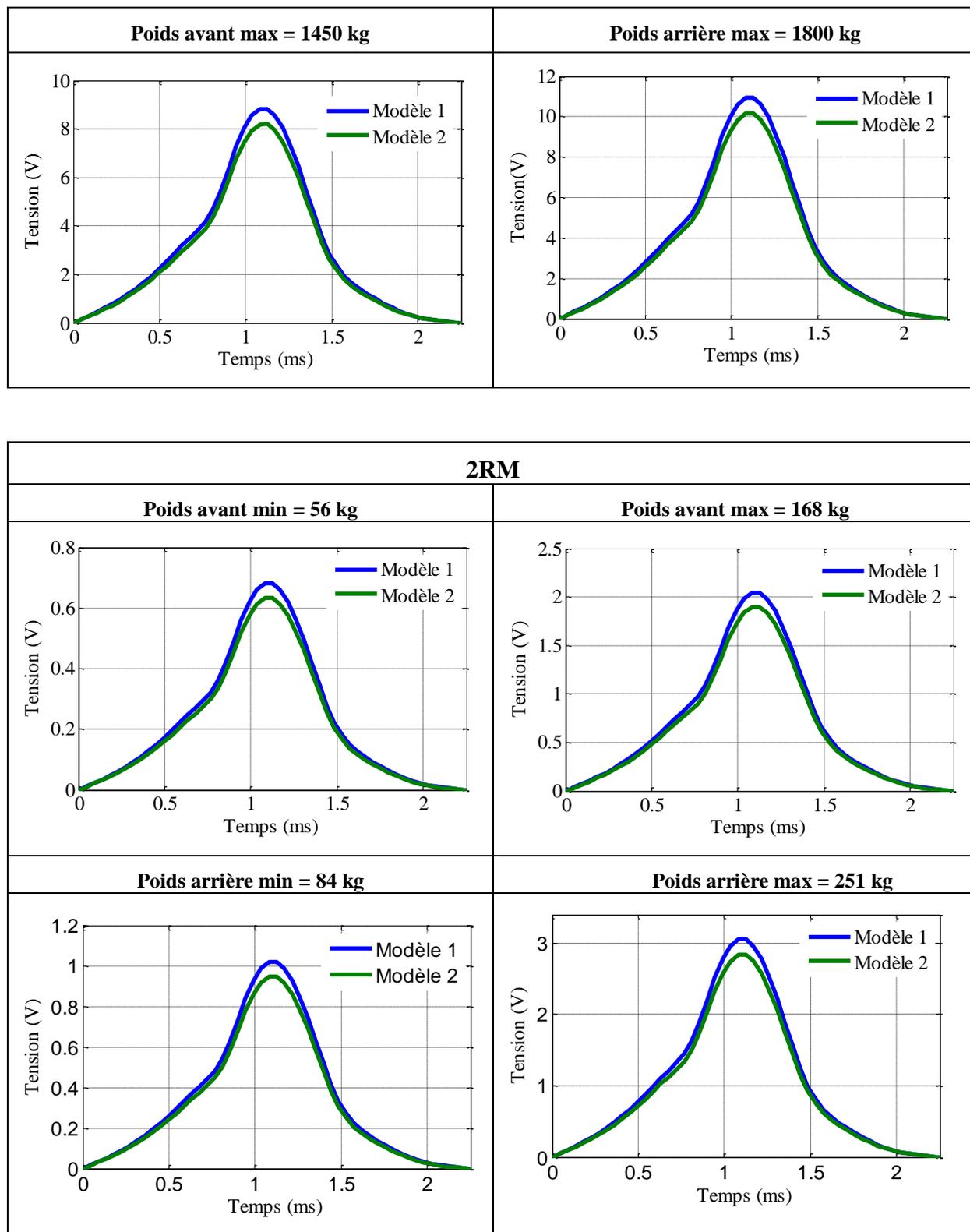
Tableau VIII.1: Temps de présence de plusieurs véhicules en ms

VIII.4.2 Identification de véhicules par le câble piézoélectrique

Le câble piézoélectrique est utilisé pour détecter les chocs des essieux qui se reproduisent. Ils se différencient entre eux par l'amplitude qui en résulte. Le choc produit par un PL est plus grand que le choc produit par un VU. Cette caractéristique importante aide à distinguer les PL des VU. Le Tableau VIII.2 présente différents chocs pour différents véhicules.



CHAPITRE 4



CHAPITRE 4

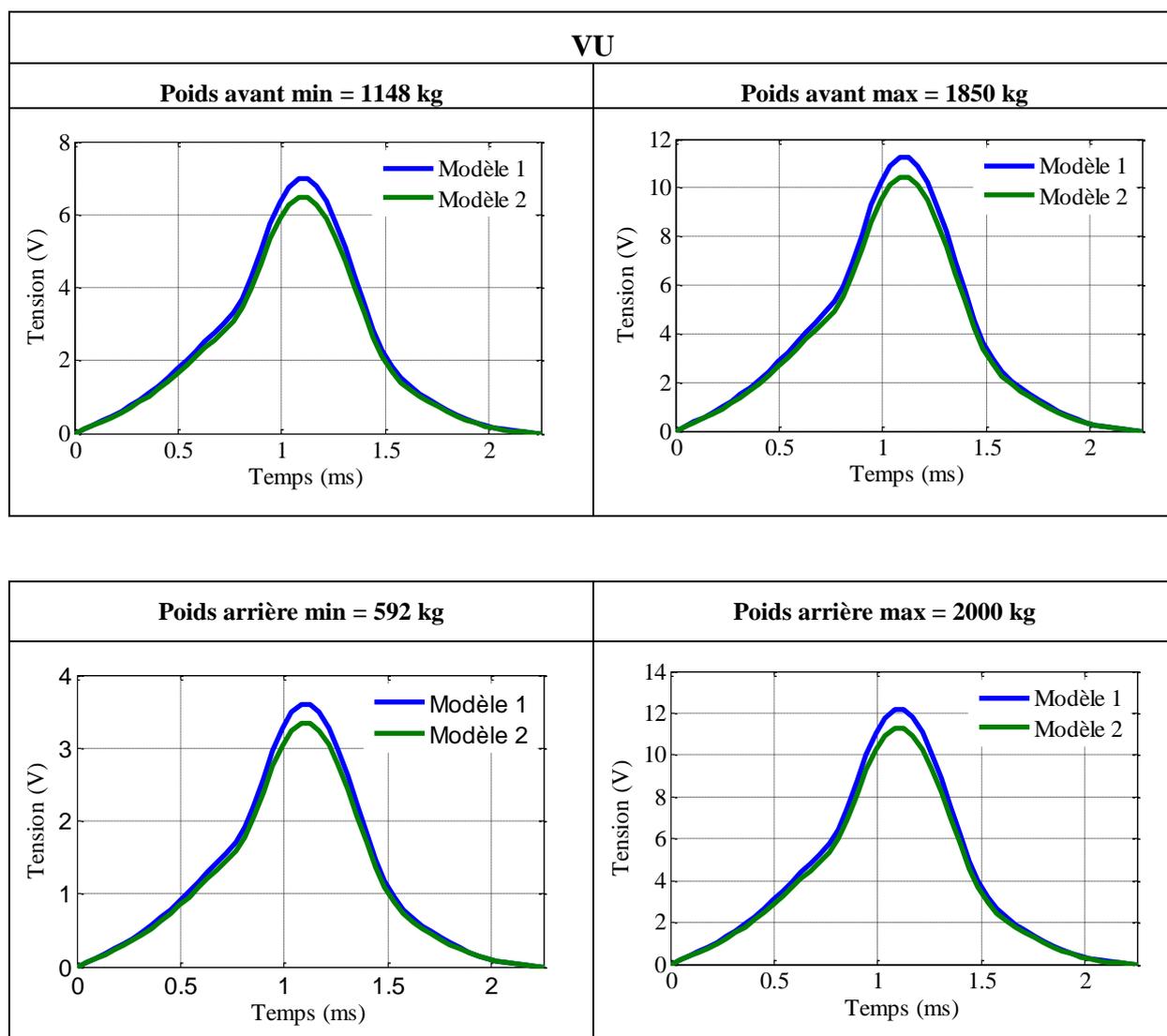


Tableau VIII.2: Différents chocs piézoélectriques pour différents véhicules ($v=80$ km/h)

VIII.4.3 Distinction entre un véhicule à 4 roues et un 2RM

La distinction peut se faire en analysant le nombre de chocs dans un créneau bien calculé. L'idée consiste à installer le câble piézoélectrique sur la chaussée en position inclinée d'un angle α (câble en travers). L'angle d'inclinaison choisi est égal à 2,5 degré.

VIII.4.3.1 Estimation du créneau de présence

Lors l'interaction entre un véhicule et le câble piézoélectrique en travers, l'angle de franchissement n'est pas nul (voir Figure VIII.2). L'inclinaison du câble nous aide à identifier les 2RM des autres véhicules à 4 roues. En effet, dans un créneau de détection, un 2RM est caractérisé par la présence d'un seul choc, alors que les véhicules à 4 roues sont caractérisés par deux chocs. Donc, il est important de définir le créneau de détection d'un choc piézoélectrique. Cela exige de tenir en compte de l'angle de franchissement des véhicules par rapport au câble et les vitesses des véhicules (voir Figure VIII.2). La durée de ce créneau est estimée en considérant une vitesse de 50 km/h et un véhicule dont la largeur est la plus grande possible (2,50 m).

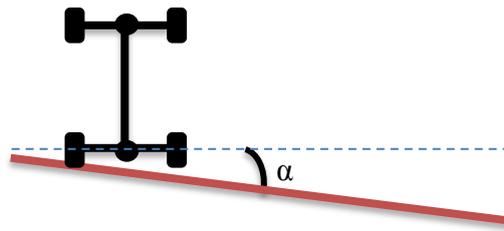


Figure VIII.2: Véhicule en interaction avec le câble piézoélectrique incliné

En termes de temps les deux roues se situent dans un créneau de 12 ms en considérant une vitesse de 50 km/h.

Le créneau permet d'inclure les chocs produits par les/la roue(s) de même essieu des véhicules roulant à une vitesse supérieure à 50 km/h. Ce choix permet aussi de ne pas détecter, dans le même créneau, les chocs des roues du deuxième essieu.

VIII.4.3.2 Identification à base de l'analyse d'un créneau de présence

Dans cette étude le créneau est fixé à 12 ms. Ce créneau est fixé en considérant un véhicule qui roule à 50 km/h. Sachant que la vitesse adoptée sur une route express est égale à 90 km/h, le créneau englobant les deux chocs des deux roues d'un même essieu roulant à cette vitesse sera plus petit qu'un créneau établi à 50 km/h. Donc, ce créneau de 12 ms englobe tous les chocs produits par les véhicules roulant à une vitesse supérieure à 50 km/h. Nous supposons qu'aucun dépassement ne se fait au niveau du câble (hypothèse réaliste).

Les véhicules à 4 roues (VL, VU et PL) sont caractérisés par un créneau de détection qui englobe deux chocs piézoélectriques.

Concernant les 2RM, nous pouvons les différencier par le choc unique qui se produit dans un créneau de 12 ms. Durant ce créneau, il n'est pas possible que la roue arrière traverse le câble.

Ainsi, nous pouvons distinguer les 2RM des autres véhicules par l'amplitude du choc piézoélectrique. En effet, les 2RM sont caractérisés par une amplitude qui ne dépasse pas 1 V dans la plupart des cas.

La Figure VIII.4 présente les chocs produits par deux véhicules dans un créneau de 12 ms. Le premier véhicule s'agit d'un véhicule à 4 roues, l'amplitude des chocs indique que ce véhicule est un PL.

Le deuxième véhicule s'agit d'un 2RM, un seul choc et une faible amplitude.

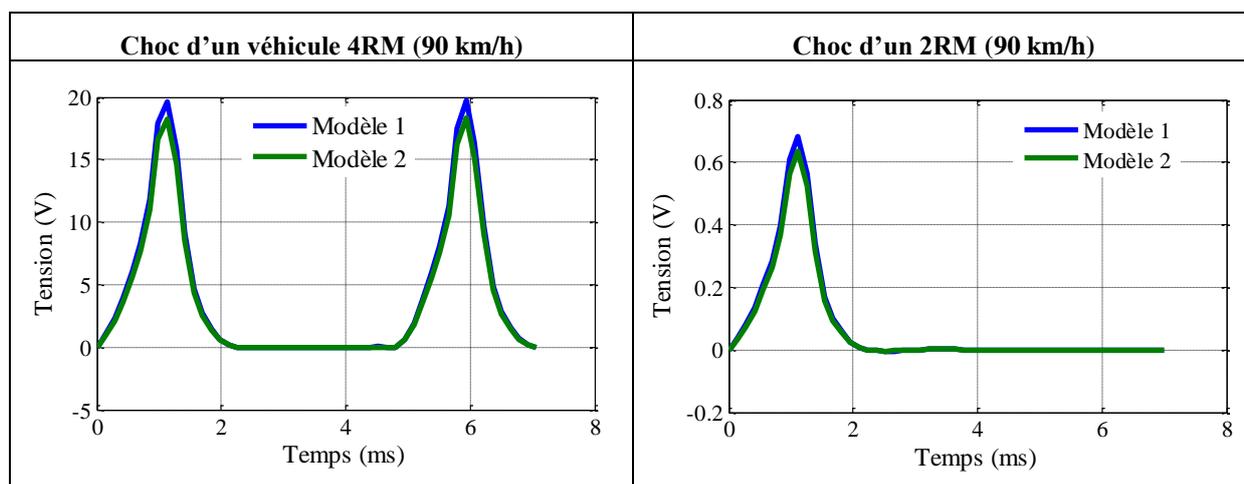


Tableau VIII.3: Chocs produits par un 2RM et un 4RM

VIII.4.4 Identification des PL

Le choc produit par les VU ainsi que les PL génère une tension de grande amplitude. Ainsi, nous pouvons les différencier en se basant sur les amplitudes des tensions générées. Pour les VU, les amplitudes sont moins grandes que pour les PL. Afin d'augmenter la précision de détection, nous préférons nous baser sur d'autres informations. Les PL ne posent pas de problème car ils peuvent être détectés directement en analysant l'amplitude des tensions générées.

Pour établir un seuil de détection des PL, nous avons considéré le camion le plus léger d'un poids de 8100 kg [30]. Le camion est supposé vide pour élargir le domaine de détection. 40 % du poids est distribué sur l'essieu avant et 60 % sur l'essieu arrière. Donc, 3240 kg sur l'essieu avant et 4860 kg sur l'essieu arrière. Une roue supporte au moins 1620 kg. Le choc piézoélectrique généré par cette roue est donné par la Figure VIII.3. L'amplitude de ce choc est retenue comme seuil de détection des PL.

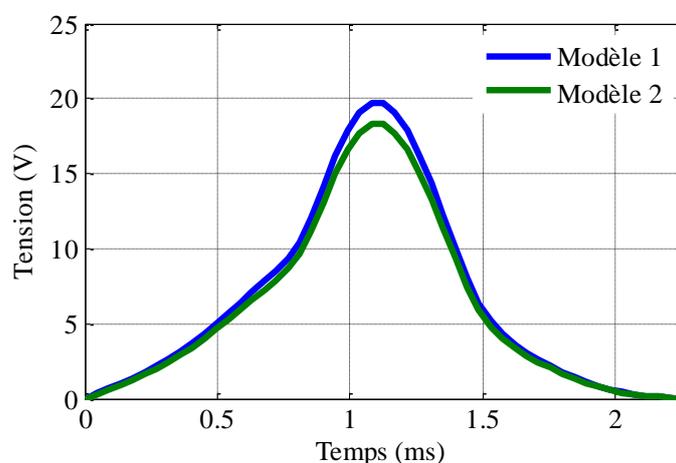


Figure VIII.3: Choc piézoélectrique produit par un PL (vitesse 80 km/h)

Le choc produit par le plus léger PL équivaut presque à deux fois le choc produit par le plus lourd VL. Nous fixons le seuil de détection des PL à 17,5 V.

VIII.4.5 Distinction entre les essieux d'un même véhicule et les essieux de véhicules différents

Les chocs détectés par un câble piézoélectrique peuvent appartenir à un seul véhicule comme ils peuvent appartenir à plusieurs. Ce problème se pose du fait de l'existence de véhicules qui disposent de plus de deux essieux (PL et VU). Donc, nous devons différencier les différents types de chocs.

La méthode proposée consiste à :

- Mesurer le temps de présence du véhicule sur la boucle.
- Communiquer l'information au détecteur du câble.

Les chocs qui se trouvent dans le même créneau de présence appartiennent au même véhicule.

VIII.5 Configuration proposée pour une route à deux voies

Le choix d'une configuration de détection, à base des boucles électromagnétiques et des câbles piézoélectriques, se base principalement sur les éléments suivants :

- Type de route (largeur de la chaussée, largeur des BAU, de la BDG et de la BDD si elles existent, nombre de voies, type de marquage au sol : continu ou discontinu).
- Hypothèses considérées : code de la route respecté ou non. Si le code de la route est respecté nous pouvons supposer par exemple que les usagers ne franchissent pas la ligne continue et ne circulent pas sur les bandes dérasées.

VIII.5.1 Caractéristiques de la route

Considérons une portion de route express à deux voies qui ne dispose pas de BAU et de BD (gauche et droite) dont la ligne du milieu est continue ce qui implique que les dépassements sont interdits. Supposons que cette route est à chaussée séparée avec une largeur de 7 m. Sur ce type de route, l'accès des vélos et des véhicules sans permis est interdit. De même, la vitesse moyenne sur ce type de route est proche de 90 km/h. Il est rare, et même impossible qu'un usager roule à moins de 50 km/h, sauf si un événement inhabituel a lieu.

VIII.5.2 Hypothèses

- Cette étude englobe tous les types de véhicules dont les caractéristiques sont décrites dans le premier chapitre.
- La ligne d'interfile est continue : nous supposons que les conducteurs des véhicules, mis à part les motards, respectent le code de la route et qu'ils n'effectuent aucun dépassement.
- La distance de sécurité longitudinale est supposée supérieure à 1,5 m. Cette condition est vérifiée pour des trafics non ralentis si les conducteurs respectent le code de la route. Nous pouvons en déduire les distances de sécurité présentées dans le tableau 5.3.

Vitesse (km/h)	50	70	90	110	130
Distance de sécurité (m)	28	39	50	62	73

Tableau VIII.4: Les distances de sécurité réglementaires pour différentes vitesses

CHAPITRE 4

- Pour estimer la vitesse du véhicule nous supposons que le trafic reste uniforme au niveau du capteur. Pour cela nous devons installer le capteur loin des feux, des intersections, des virages et de toutes autres portions qui ralentissent le trafic.
- Nous supposons que les véhicules ne changent pas de position au niveau du capteur, pour cela le système doit être installé sur une portion linéaire de la chaussée.
- Les 3RM ne sont pas considérés.

VIII.5.3 Configuration proposée

Le capteur hybride choisi pour cette route contient deux boucles électromagnétiques de forme rectangulaire dont la largeur est égale à 1,75 m et dont la longueur est égale à 1,5 m. Les deux boucles sont enterrées en pleine voie. Le câble piézoélectrique a une longueur de 6,5 m et il s'étend sur la largeur de la chaussée (Figure VIII.4: Configuration 1).

Cette configuration suppose que les véhicules (excepté les 2RM) restent sur la voie, ils ne franchissent jamais l'interfile.

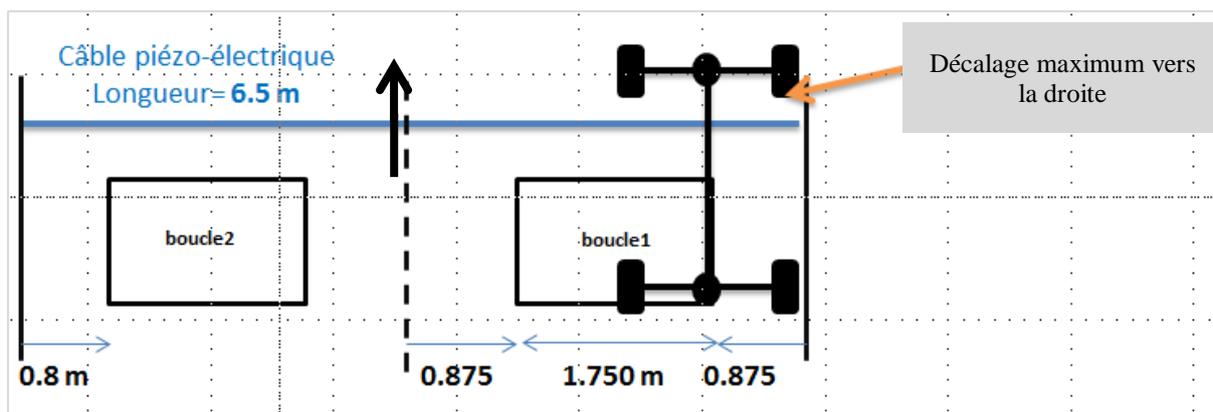


Figure VIII.4: Configuration 1

Le Tableau VIII.5 indique les valeurs de la sensibilité maximale pour plusieurs hauteurs de châssis dans le cas où la boucle est recouverte de 50 %. En aucun cas, le recouvrement est inférieur à 50 %.

Hauteur du châssis (cm)	$S_I(\%)$
14	1,2530
12,1	1,3826
18,1	1,0398

Tableau VIII.5: Sensibilité de plusieurs véhicules pour un recouvrement de 50 %

Nous remarquons bien que si on fixe un seuil de détection de 1 %, tous les véhicules seront détectés, La plus petite valeur est égale à 1,0398 %

VIII.5.4 Évaluation de la configuration proposée

Les différents scénarios qui peuvent se reproduire sur un trafic, en tenant compte des hypothèses décrites dans le paragraphe (VIII.5.2), sont présentés en le Tableau VIII.6.

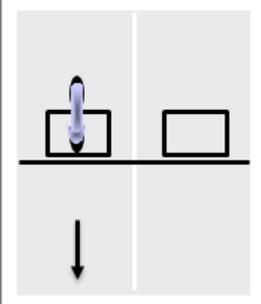
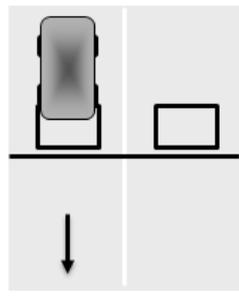
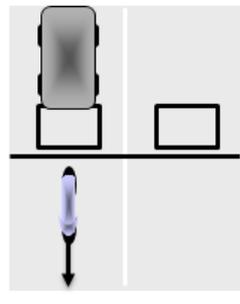
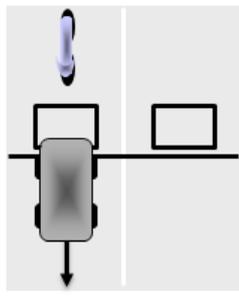
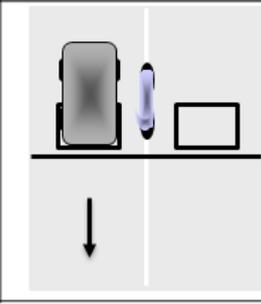
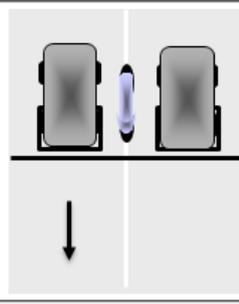
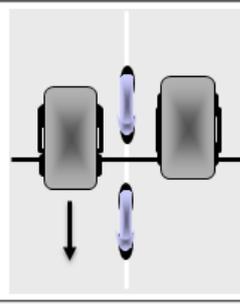
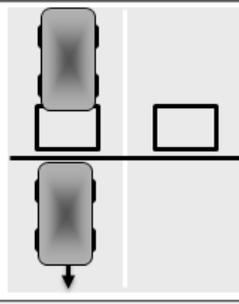
1. Moto seul	2. Voiture seule	3. Moto avant voiture	4. Moto après voiture
			
5. Voiture et moto	6. Moto entre 2 voiture	7. Moto en interfile	8. Voitures se suivent
			

Tableau VIII.6: Scénarios qui peuvent se reproduire sur une chaussée

La configuration présentée dans la Figure VIII.4 sera discutée selon les scénarios présentés sur le Tableau VIII.6. Elle devra être apte à détecter et à distinguer les différents cas possibles. Ces scénarios peuvent être classés en deux catégories :

Les scénarios 1, 2, 3, 4 et 8 représentent les cas où le code de la route est respecté par tous les usagers.

Les scénarios 5, 6 et 7 représentent les cas où les 2RM ne respectent pas le code de la route du fait du franchissement de la ligne continue.

VIII.5.4.1 Cas d'un trafic sans dépassement

Un seul véhicule traverse la boucle électromagnétique, aucun dépassement dans cette tranche ne sera effectué (voir Figure VIII.5).

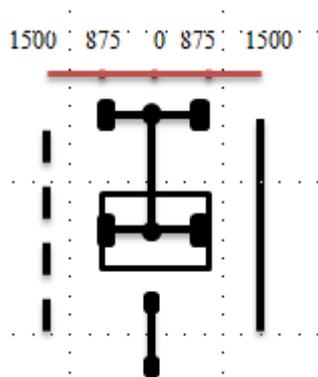


Figure VIII.5: Trafic normal

Dans ce cas, le véhicule est détecté par la boucle quel que soit son recouvrement. Les 2RM ne seront pas détecté par la boucle (la distance de sécurité longitudinale assure que la boucle ne soit jamais recouverte par deux véhicules).

VIII.5.4.2 Cas des dépassements

Théoriquement deux scénarios peuvent se présenter en cas de dépassement :

- Dépassement d'un VL.
- Dépassement d'un 2RM.

Un dépassement ne peut pas se réaliser sans considérer une distance latérale séparant les deux véhicules. Cette distance dépend surtout du trafic ainsi que des conditions climatiques.

La largeur des rétroviseurs est un élément important à considérer lors de l'analyse des cas de dépassements.

En aucun cas un deuxième VL ne peut recouvrir une partie de la boucle non recouverte par le premier VL, même si dans le cas où le premier VL se déporte sur la droite de 875 mm (Figure VIII.6).

En tenant compte des distances de sécurité et des largeurs des rétroviseurs, les calculs effectués montrent qu'un 2RM ne peut jamais recouvrir une partie de la boucle non recouverte par le VL.

Nous concluons que dans le cas où une manœuvre de dépassement s'effectue, la sensibilité de la boucle ne sera pas affectée par le deuxième véhicule.

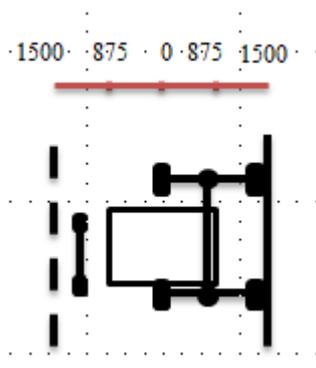


Figure VIII.6: Dépassement d'un 2RM

VIII.5.5 Algorithmes de détection

Le traitement des signaux issus des boucles et du câble se fait en plusieurs étapes. Nous présentons ci-dessous un algorithme qui englobe ces différentes étapes.

- Première étape :

Elle est dédiée à la récupération des signaux des deux boucles électromagnétiques (t_{11}, S_{11}) , (t_{12}, S_{12}) et de ceux du câble piézoélectrique (t_c, V_c) . Sachant que $(t_{11}$ et $t_{12})$ représentent les instants de détection, $(S_{11}$ et $S_{12})$ les sensibilités des deux boucles et (t_c, V_c) la tension générée par le câble piézoélectrique.

- Deuxième étape :

Elle consiste à calculer le nombre de véhicules détectés par les boucles :

- Si $S_{11} \geq S_{1min}$ \rightarrow incrémentation du compteur $t_n \rightarrow$ sauvegarde de (t_n, S_n) .
- Calcul de (S_{11max}) pour chaque incrémentation
- Si $S_{12} \geq S_{1min}$ \rightarrow incrémentation du compteur $t_m \rightarrow$ sauvegarde de (t_m, S_m) .
- Calcul de (S_{12max}) pour chaque incrémentation
- Le nombre de véhicules = $n + m$

- Troisième étape :

Elle consiste à calculer le nombre de véhicules détectés par le câble

- Pour connaître le nombre de véhicules détectés par le câble, incluant les 2RM, nous nous reporterons aux méthodes décrites dans le paragraphe V.4 dans lequel nous avons expliqué comment déduire le nombre de véhicules en se basant sur le nombre de chocs.
- Le nombre des VU, PL et VL (Paragraphe VIII.4)

- Quatrième étape

Le nombre des 2RM se détermine en déduisant le nombre des véhicules détectés par les boucles du nombre des véhicules détectés par le câble.

VIII.5.6 Avantages

En considérant les différentes hypothèses décrites précédemment, nous remarquons que l'algorithme de détection est assez simple.

VIII.5.7 Inconvénients

Malgré que la ligne du milieu soit continue et que le code de la route interdise son franchissement, ce règlement n'est pas respecté par tous les usagers, ce qui réduit la précision de détection.

VIII.6 Correction de la configuration pour une route à ligne discontinue

Nous précédon à la correction de la configuration présentée dans le paragraphe précédent. Nous supposons que la ligne de l'interfile est discontinue et que les usagers (tous type de véhicules) peuvent effectuer une manœuvre de dépassement.

VIII.6.1 Hypothèses

Nous supposons que la route dispose de :

- 2 voies (2 x 3,5) m
- D'une absence des bandes dérasées à gauche et à droite ou non accès aux usagers.
- D'une ligne longitudinale discontinue qui autorise les dépassements qui par la gauche.

Nous supposons un trafic fluide (le cas des embouteillages n'est pas considéré) et que les usagers de la route respectent :

- Une distance latérale de sécurité $\geq 0,4$ m
- Une distance de sécurité longitudinale $\geq 1,5$ m

VIII.6.2 Configuration proposée

- largeur de la boucle = 1,75 m
- longueur de la boucle = 1,5 m

La Figure VIII.7 présente la configuration du capteur retenue pour une route à deux voies à sens unique. Les différentes dimensions des boucles et du câble, la distance entre boucles ainsi que les distances entre boucles et les extrémités de la chaussée sont indiquées sur la Figure VIII.7. La distance entre boucles est fixée à 7,5 cm. Cette distance réduit les perturbations magnétiques qui peuvent engendrer des fausses-détections mais elle n'influe pas sur la détection des véhicules

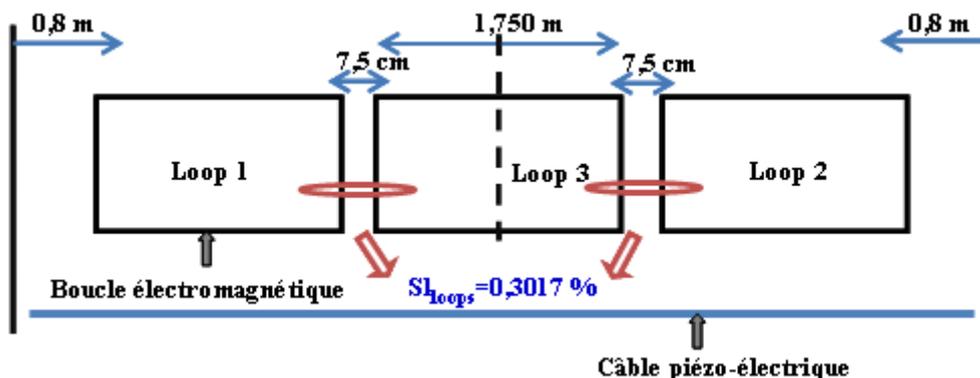


Figure VIII.7: Configuration optimisée du capteur hybride

VIII.6.3 Évaluation de la configuration proposée

L'évaluation de la configuration présentée dans la Figure VIII.7 se fait en imaginant les différents scénarios qui peuvent se reproduire pour les boucles et pour le câble utilisés. La configuration devra être apte à identifier tous les cas possibles.

Il apparaît logique que les scénarios peuvent être reproduit par un seul véhicule comme ils peuvent être reproduit par deux véhicules.

Nous commençons tout d'abord par les scénarios où la boucle est recouverte par deux véhicules comme présenté dans la Figure VIII.8.

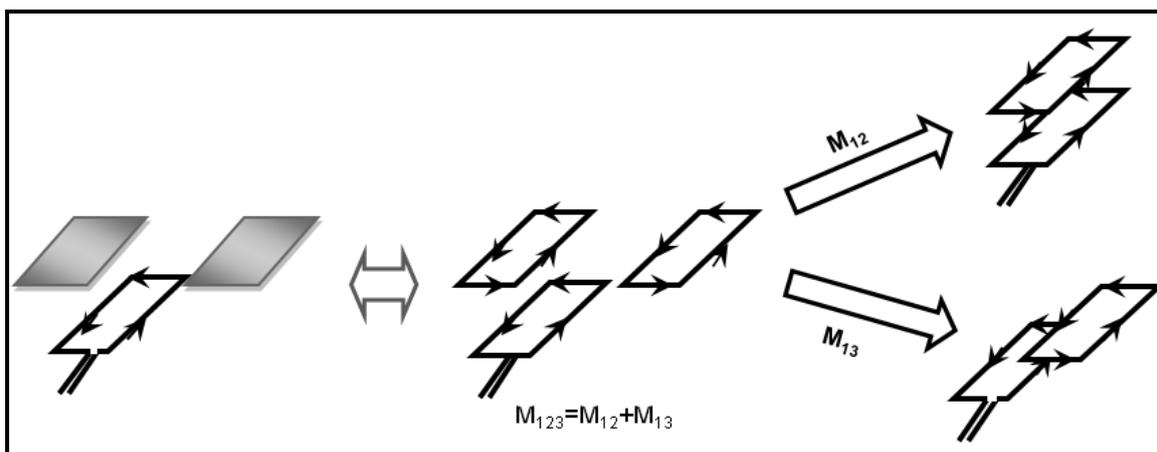


Figure VIII.8: Boucle recouverte par deux véhicules

L'étude présentée dans le deuxième chapitre montre que la sensibilité de la boucle électromagnétique en présence de deux véhicules est égale à la somme des deux sensibilités générées par les deux véhicules. Les calculs effectués sur une boucle électromagnétique de dimension (1,75 ; 1,5) m² recouverte partiellement par deux véhicules montrent que la plus grande valeur de sensibilité engendrée reste inférieure au seuil de sensibilité (1%).

- La sensibilité est égale à 0,49 % si en considère une distance de sécurité (entre les rétroviseurs) de 1 m.
- La sensibilité est égale à 0,8 % si en considère une distance de sécurité de 0,6 m.

Nous déduisons donc qu'une boucle électromagnétique n'est jamais activée par deux véhicules.

Ensuite, nous recueillons dans le Tableau VIII.7 les différentes positions de véhicule sur la chaussée. Ces positions représentent les différents scénarios qui peuvent se reproduire au niveau du capteur magnétique.

CHAPITRE 4

	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Totalemment recouverte	Non recouverte	Non recouverte
	Activée	Non activée	Non activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Partiellement recouverte	Partiellement recouverte	Non recouverte
	Activée	Non activée	Non activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Partiellement recouverte	Partiellement recouverte	Non recouverte
	Activée	Activée	Non Activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Non recouverte	Totalemment recouverte	Non recouverte
	Non Activée	Activée	Non Activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Non recouverte	Non recouverte	Totalemment recouverte
	Non activée	Non activée	activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Non recouverte	Partiellement recouverte	Partiellement recouverte
	Non Activée	activée	Non activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Partiellement recouverte	Partiellement recouverte	Non recouverte
	Non activée	activée	Non activée
	Boucle 1	Boucle 3	Boucle 2
	Non recouverte	Partiellement recouverte	Partiellement recouverte
	Non Activée	Non Activée	Activée

Tableau VIII.7: Différentes positions d'un véhicule sur la chaussée

CHAPITRE 4

La méthode d'identification des véhicules par les boucles électromagnétiques est identique à celle présentée dans le paragraphe VIII.4.

Du tableau 5.5 nous en déduisons les remarques suivantes :

- Un véhicule peut recouvrir une ou deux boucles simultanément.
- Une ou deux boucles peuvent être activées simultanément.
- Pour que la détection se déclenche, un véhicule doit recouvrir une boucle partiellement ou totalement. Ce recouvrement doit générer une sensibilité supérieure au seuil de détection.
- La boucle activée indique l'emplacement du véhicule.
- Le véhicule est en interfile si la boucle du milieu est activée.
- Cette configuration est plus performante vue la possibilité qu'elle offre pour détecter les véhicules en inter-files

Les méthodes de détections présentées dans le paragraphe VIII.4 traitent les données de manière indépendante, chaque boucle est traitée séparément de l'autre. Mais il arrive que la détection d'un seul véhicule se fasse par plusieurs boucles, ce qui engendre des fausses détections. Il est donc nécessaire de compléter ces méthodes de détection par des algorithmes qui permettent de traiter les données des boucles de manière intelligente (paragraphe VIII.6.4).

Le câble est utilisé pour détecter les chocs des essieux de la même manière que celle présentée dans le paragraphe VIII.4. La détection se fait dans un créneau de détection qui se caractérise par l'existence d'un ou deux chocs piézoélectriques, selon le type de véhicule. Le tableau 5.6 présente les deux types de chocs qui peuvent exister dans un créneau de détection.

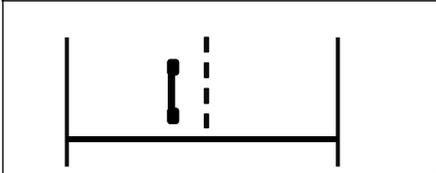
 A schematic diagram showing a vehicle axle (represented by a vertical bar) passing through a detection zone (represented by a horizontal bar). A dashed vertical line indicates the position of the axle. A single vertical bar on the axle represents a single piezoelectric shock.	Un seul choc piézoélectrique dans un créneau de détection
 A schematic diagram showing a vehicle axle (represented by a vertical bar) passing through a detection zone (represented by a horizontal bar). A dashed vertical line indicates the position of the axle. Two vertical bars on the axle represent two piezoelectric shocks.	Deux chocs piézoélectriques dans un créneau de détection

Tableau VIII.8: Quelques scénarios qui décrivent l'interaction véhicules-câble

VIII.6.4 Algorithmes de traitement

Nous nous sommes basés sur le Tableau VIII.9 pour développer des algorithmes de traitement des données du capteur hybride avec la configuration présentée sur la Figure VIII.7.

Le Tableau VIII.9 présente un exemple non exhaustif de scénarios pouvant être traités par les algorithmes associés au capteur hybride.

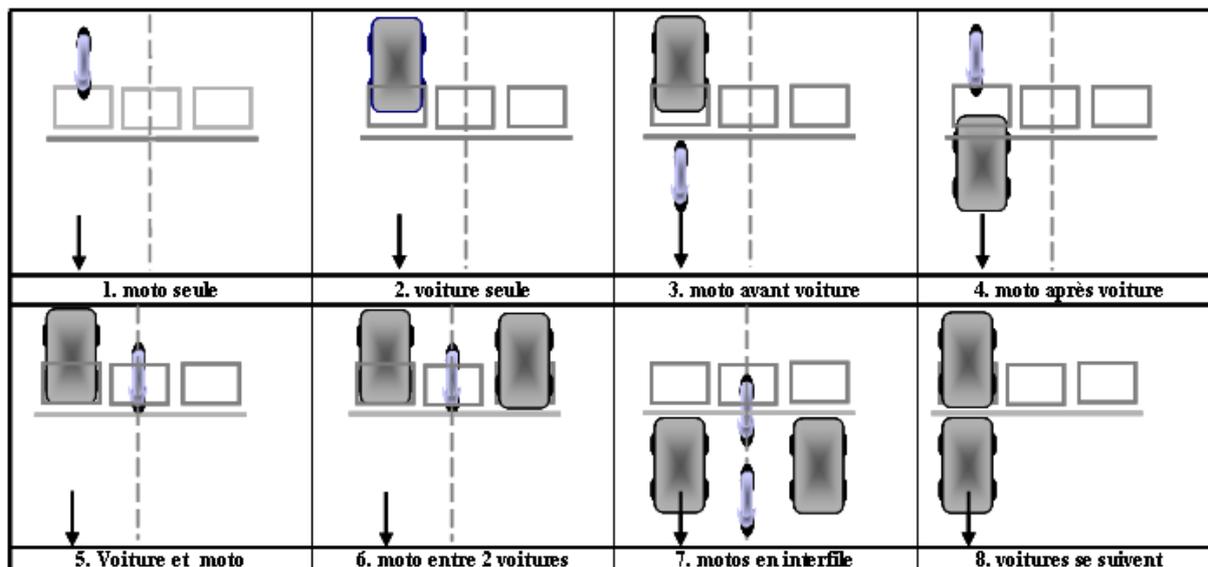


Tableau VIII.9: Exemples de scénarios

Les algorithmes développés permettent non seulement la distinction des différents types de véhicules (VL, VU, PL et 2RM) mais aussi la détermination de leurs vitesses ainsi que de leurs positions sur la chaussée. Les différents objectifs de l’algorithme de détection sont les suivants :

- Acquisition des signaux de boucles et de câbles (voir annexe X.3.1)
- La discrimination entre les différents types de véhicules (voir annexe X.3.2)
- Emplacement des véhicules sur la chaussée
- Mesure de la vitesse des véhicules.

VIII.6.4.1 Emplacement des véhicules sur la chaussée

La position du véhicule correspond à la boucle activée. Le véhicule est en plein-file si les boucles n°1 ou n°2 sont activées (voir Figure VIII.7). Il est en interfile si la boucle du milieu est activée. Par contre le positionnement des 2RM reste difficile à identifier pour le moment.

VIII.6.4.2 Mesure de la vitesse

Pour mesurer la vitesse des véhicules avec précision nous proposons de renforcer la configuration précédente par trois boucles situées à une distance d des autres boucles, comme indiqué sur la Figure VIII.9.

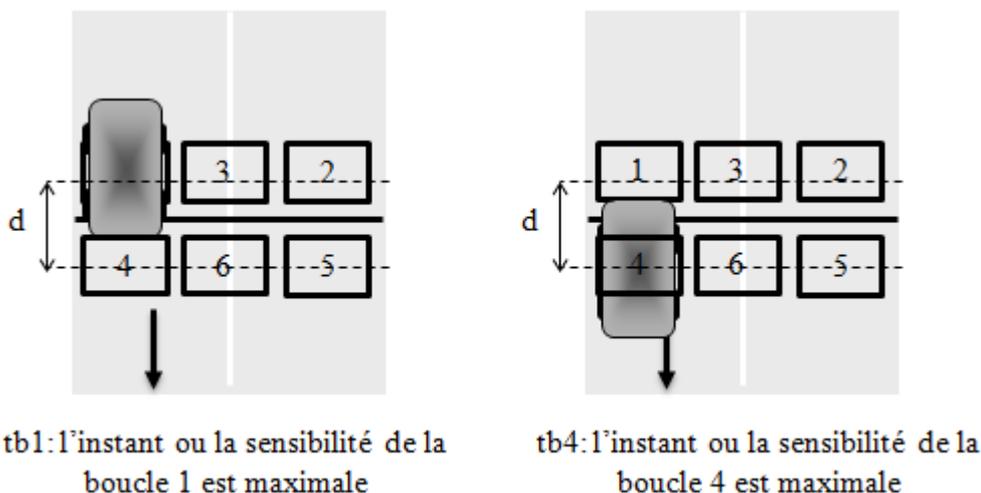


Figure VIII.9: Configuration utilisée pour la mesure des vitesses

La mesure de la vitesse se fait par l'algorithme suivant :

- Quand $S_{11}=S_{11max}$
 → déclenchement d'une horloge t_b
- Quand $S_{14}=S_{14max}$
 → $t_{b4}= t_b(S_{14}=S_{14max})$
- $V= d/ (t_{b4})$

La distance d entre boucles doit être petite pour éliminer les dépassements dans la portion de longueur d .

La mesure des vitesses des 2RM n'est pas réalisable avec cette configuration. La solution envisagée consiste à utiliser un autre câble piézoélectrique situé à une distance d du premier câble, une solution efficace mais couteuse.

VIII.7 Synthèse

Le travail de dimensionnement présenté dans ce chapitre s'est basé sur le travail de modélisation présenté dans le deuxième et le troisième chapitre, ainsi que sur les caractéristiques des routes et des véhicules présentées dans le premier chapitre. La démarche suivie a comme objectif le dimensionnement du capteur hybride (composé de boucles électromagnétiques et de câble piézoélectrique) ainsi que le développement des algorithmes de détection. Nous nous sommes basés sur la forme des signatures des différents véhicules ainsi que sur les chocs piézoélectriques, pour identifier les différents types de véhicules, mesurer leur vitesses, détecter leur positions sur la chaussée et connaître leur temps de présence. La configuration proposée ainsi que les algorithmes associés sont dédiés à une route à deux voies sans bandes dérasées (ou en supposant le non accès). La même démarche peut être suivie pour établir d'autres configurations pour d'autres types de routes.

IX. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

IX.1 Conclusion générale

L'objectif principal de cette thèse était de dimensionner et d'optimiser un capteur hybride de trafic à base de boucles électromagnétiques et de câbles piézoélectriques capable d'identifier les 2RM des autres véhicules circulants sur une route donnée. En effet, une revue sur les chiffres de l'insécurité routière relative à la mortalité des usagers des 2RM montre la nécessité de développer un système capable de les détecter et de suivre leurs comportements dans le trafic.

Pour commencer, une connaissance approfondie des différentes configurations et caractéristiques des routes ainsi que les différentes catégories des véhicules était nécessaire pour l'optimisation du système.

Pour le développement de ce système, des modèles analytiques tridimensionnels des boucles électromagnétiques de formes rectangulaires et circulaires ont été développés. En effet, la conception d'un système de détection fiable passe par la connaissance des caractéristiques magnétiques de ces boucles en absence et en présence des véhicules. Les modèles ainsi développés étudient les différentes interactions qui ont lieu entre les boucles elles-mêmes et entre les boucles et les véhicules. Cette étude a été validée par une approche numérique tridimensionnelle au moyen du logiciel de calcul de champ Flux3D puis évaluée expérimentalement sur un banc d'essai à échelle réduite ainsi que sur un site contrôlé.

Les modèles établis ont permis de choisir la forme et les dimensions de la boucle pouvant être utilisé pour la réalisation du capteur hybride et de définir les paramètres importants dans la détection.

Deux autres modèles électromécaniques d'un câble piézoélectrique de forme plate en interaction avec les roues des véhicules ont été développés. Le premier modèle unidimensionnel suppose l'existence d'une onde longitudinale unidirectionnelle créée par la pression exercée sur une face du câble. Cette onde, qui résulte de la déformation dans le matériau, est la cause principale de la tension qui se génère entre les deux électrodes placées sur la face supérieure et inférieure du câble. Le second modèle que nous avons développé est basé sur le développement analytique des équations de la piézoélectricité. Ces deux modèles ont été utilisés pour identifier les différents chocs engendrés par différents véhicules circulant sur le réseau routier.

Par ailleurs une approche de dimensionnement du capteur hybride à base des modèles analytiques des boucles électromagnétiques et de câble piézoélectrique, prenant en compte l'état du trafic et le comportement des usagers (respect ou non du code de la route), a été proposée. Ainsi un capteur hybride pour une route à deux voies a été dimensionné et optimisé.

Une méthode de traitement des données permettant de caractériser le trafic a également été développée. Cette caractérisation permet d'identifier les véhicules, d'estimer leurs vitesses et de donner leurs positions sur la chaussée.

Les approches de dimensionnement et d'optimisation présentées peuvent être appliquées à d'autres types de routes.

Pour la validation des modèles, il était nécessaire de connaître si les valeurs mesurées par le détecteur électronique et celles engendrées au niveau du capteur hybride sont les mêmes ou différentes. Pour cela, nous nous sommes référées à des documents techniques pour établir les relations existantes entre les variations engendrées au niveau du capteur de trafic (sensibilité et tension) et celles mesurées par le détecteur électronique (fréquence et tension amplifiée).

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Les résultats trouvés montrent l'existence d'un rapport d'amplification que nous devrions prendre en compte.

L'étude présentée dans cette thèse nous a permis d'atteindre d'autres objectifs non soulignés parmi les objectifs principaux. On cite principalement la possibilité d'identifier d'autres types de véhicules (VL, PL, VU), de mesurer leurs vitesses et leurs positions sur la chaussée.

IX.2 Perspectives

De manière générale, nous visons dans nos futurs travaux à court terme de faire des simulations et des évaluations expérimentales supplémentaires afin de perfectionner et de comparer nos approches proposées dans cette thèse avec d'autres approches existantes dans la littérature.

Pour la première approche, nous souhaitons faire des évaluations des modèles développées ainsi que les configurations proposées. Cette évaluation peut se faire sur un site contrôlé.

Nous voudrions ensuite compléter les modèles proposées par d'autres qui modélisent l'interaction entre les 2RM et les boucles électromagnétiques.

À long terme, nous visons l'optimisation du coût de ce système hybride qui passe obligatoirement par le remplacement du câble piézoélectrique.

IX.2.1 Évaluation de la configuration sur un site contrôlé

Nous souhaitons réaliser des essais d'évaluations des configurations proposées et des algorithmes développés. Ces essais devront être réalisés sur un site contrôlé afin d'assurer la sécurité des usagers. L'acquisition des données sera faite par le détecteur MIXTRA de la société STERELA. Le système de détection global est présenté sur la Figure IX.1.

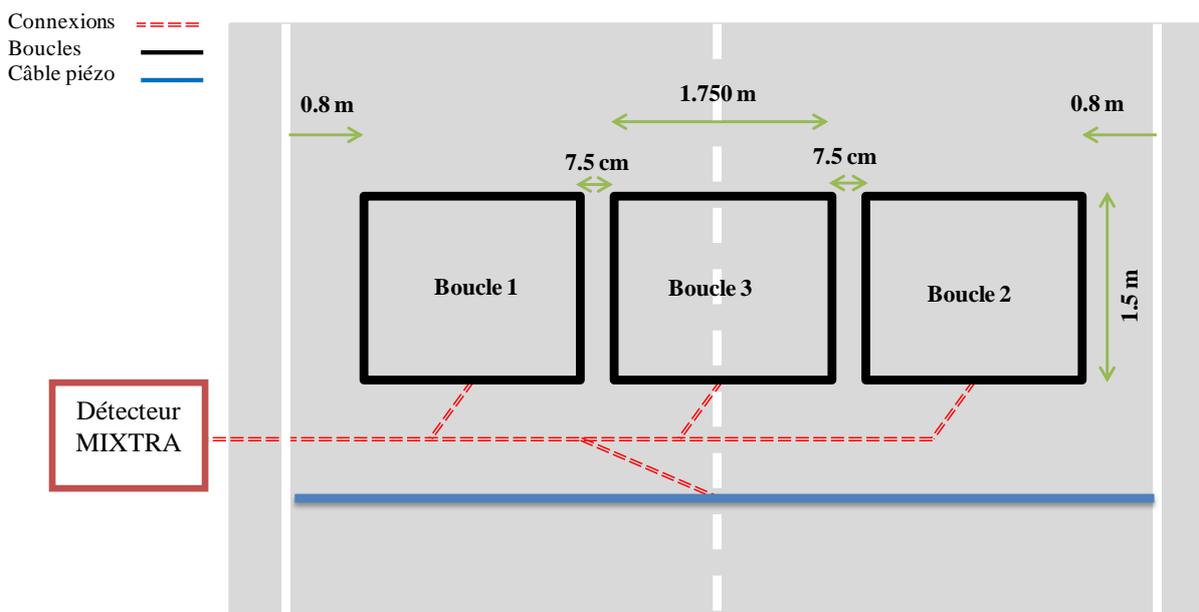


Figure IX.1: Principe d'implantation d'un capteur hybride pour une route à 2 voies de circulation

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

IX.2.2 Modélisation de l'interaction entre une 2RM et une boucle électromagnétique

Les mesures effectuées sur terrain montrent que lorsqu'une 2RM traverse le périmètre d'une boucle, la sensibilité sera plus affectée que lorsqu'elle la traverse en plein milieu. Cela a été justifié par la position des roues par rapport au périmètre de la boucle. Cette position augmentera la surface exposée aux lignes de champ engendré par la boucle électromagnétique. En effet, lorsqu'une roue traverse le périmètre d'une boucle comme indiqué sur la Figure IX.2.a, la surface exposée aux lignes de champ est maximale, ce qui augmente le flux mutuel. Par contre, cette surface est nulle quand la boucle est traversée en pleine milieu (voir Figure IX.2.b).

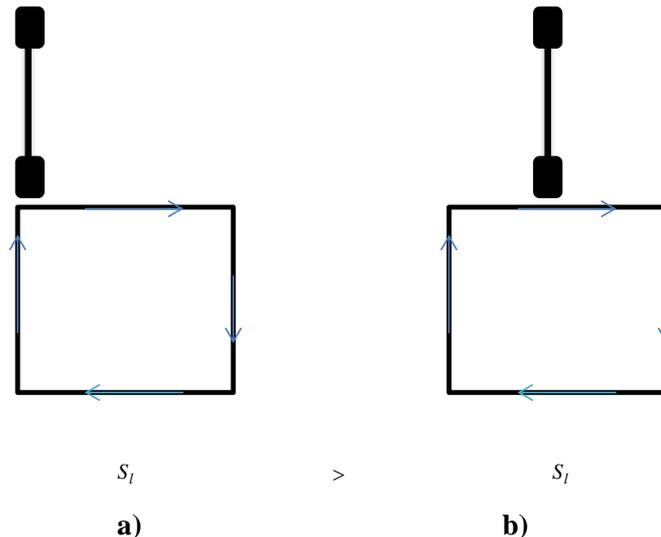


Figure IX.2: Affection de la sensibilité selon la position d'un 2RM

Ainsi, le modèle de l'interaction entre les roues et la boucle électromagnétique peut être approximé par une boucle circulaire court-circuitée, en position verticale, en interaction avec une boucle rectangulaire.

IX.2.3 Remplacement du câble piézoélectrique par des boucles électromagnétique

La littérature montre que l'usage du câble piézoélectrique est plus contraignant que les boucles en termes d'installation et aussi de prix. L'étude effectuée dans ce mémoire montre la possibilité de remplacer le câble piézoélectrique par des boucles électromagnétiques afin de réduire le coût et faciliter l'installation, sans influencer sur la précision de détection.

Dans ce cas, la stratégie de détection change, les 2RM seront prises par les boucles électromagnétiques.

La boucle qui peut remplacer le câble piézoélectrique devra générer une distribution de champ uniforme qui recouvre les zones pauvres de champs. En effet, ces zones peuvent acquérir les véhicules de petite taille, ce qui rend leur détection impossible.

Pour rendre la boucle plus sensible à la présence des 2RM, surtout en plein file, on propose d'utiliser des boucles qui disposent de segments inclinés, c'est le cas des boucles de formes parallélogramme. L'inclinaison des segments de la boucle permet d'augmenter la surface exposée aux lignes de champs sur toute la largeur de la voie.

IX.2.4 D'autres perspectives

Nous voudrions compléter cette étude par une validation expérimentale des modèles électromécaniques développés pour le câble. La possibilité qui offre le détecteur MIXTRA à acquérir les données du câble, nous encourage et nous facilite la tâche de validation des modèles établis. Nous présentons dans la première annexe la relation entre la tension mesurée par le détecteur MIXTRA et la tension réelle générée par le câble piézoélectrique.

La configuration développée ainsi que les algorithmes sont dédiés à une route à deux voies. En suivant la même démarche, nous pouvons établir d'autres configurations pour d'autres types de routes qui disposent d'un nombre de voies différent et de différents sens de circulation.

L'étude présentée dans ce rapport peut être complétée en incluant l'identification d'autres types de véhicules (ex : 3RM).

X. ANNEXES

X.1 Annexe 1

**L'électronique associée aux boucles électromagnétiques et au câble
piézoélectrique**

X.1.1 Introduction

La modélisation électronique des circuits d'acquisitions associés aux boucles électromagnétiques et au câble piézoélectrique a comme objectif d'établir les rapports qui existent entre :

- La variation de la fréquence d'oscillation du détecteur électronique et la sensibilité de la boucle électromagnétique
- La tension générée par le câble et la tension mesurée par le détecteur électronique.

Ces rapports traduisent l'impact des conditionneurs électroniques utilisés entre le capteur hybride et le système de traitement.

X.1.2 L'électronique associée aux boucles électromagnétiques

Pour le cas des boucles électromagnétiques, le système de détection est constitué d'une boucle électromagnétique, d'une queue, d'un regard et d'un câble de liaison raccordé à un détecteur électronique sinusoïdale comme illustré sur la Figure 0.1 [72] .

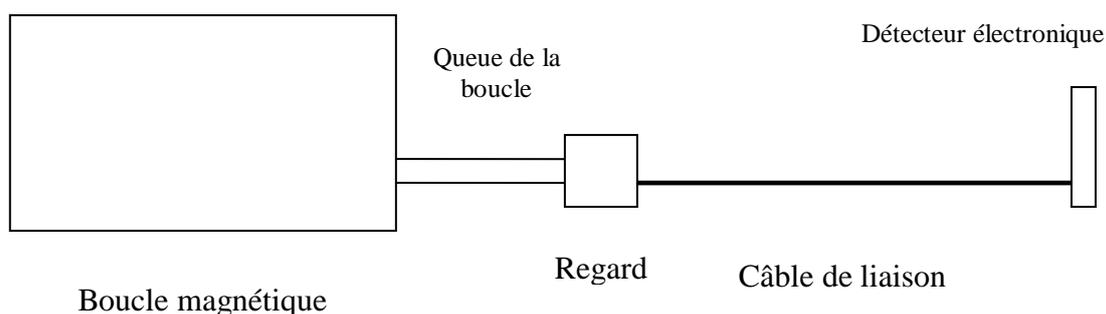


Figure 0.1: Système de détection à base de boucle électromagnétique de forme rectangulaire

La sensibilité engendrée par le passage d'un véhicule au-dessus d'une boucle électromagnétique se traduit par une variation de fréquence au niveau du détecteur électronique. En effet, le détecteur électronique est à la base d'un oscillateur qui alimente la boucle par un courant de fréquence donnée. Cette fréquence est établie par le circuit de réaction et à chaque fois les paramètres (RLC) de ce circuit varient. Dans le cas présent, c'est la valeur de l'inductance qui varie (sensibilité).

L'oscillateur peut être modélisé par un dipôle séparé en deux parties : le résonateur et l'amplificateur (voir Figure 0.2). Le résonateur (le circuit de réaction) est le circuit électrique «RLC» qui permet de fixer la fréquence d'oscillation. L'amplificateur est la partie non linéaire dont les paramètres dépendent faiblement de la fréquence d'oscillation (voir Figure 0.2).

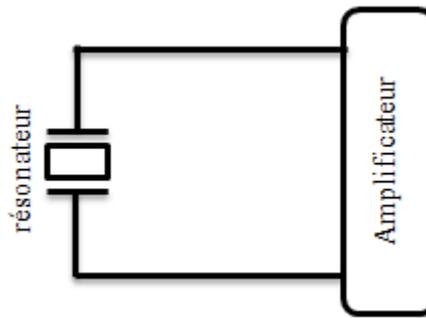


Figure 0.2: Schéma équivalent d'un oscillateur électronique

X.1.2.1 Modélisation de la partie amplificateur

Le schéma de base de l'amplificateur est présenté en Figure 0.3.

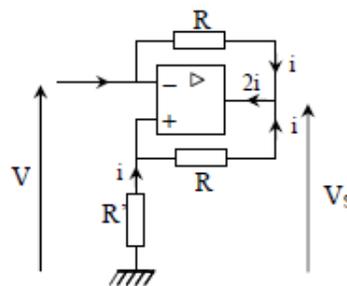


Figure 0.3: Amplificateur d'un oscillateur quasi stationnaire

L'oscillateur sinusoïdal utilisé délivre un signal pratiquement sinusoïdal à partir d'une source continue. Ces dispositifs fonctionnent la plupart du temps en régime linéaire mais les effets non linéaires, même s'ils interviennent peu, sont fondamentaux car ce sont eux qui limitent l'amplitude des oscillations.

Lorsque l'amplificateur fonctionne en régime linéaire, on a $\zeta = 0$ donc $V_+ = V_-$. Dans ces conditions, les deux résistances R sont soumises aux mêmes potentiels V et V_s à leurs bornes. Donc, le courant circulant dans ces deux résistances a la même valeur et le même sens (le courant de sortie de l'amplificateur vaut alors $i_s = 2i$). Ce courant i circule aussi dans la résistance R puisque $i^+ = 0$. Comme $V = V_- = V_+$, on voit immédiatement que l'impédance du montage en régime linéaire vaut :

$$Z_D = \frac{V}{i} = R' = -R_a$$

On conclut que le montage se comportera comme une résistance négative en régime linéaire :

$$Z_D = \frac{V}{i} = -R_a \quad (0.1)$$

X.1.2.2 La fréquence d'oscillation de l'oscillateur

Le circuit équivalent de l'oscillateur sinusoïdal se résume en une résistance négative R_a connectée à un circuit résonant RLC. Les éléments du circuit résonnant (L_b , C_b et R_b) déterminent la fréquence d'oscillation (Figure 0.4).

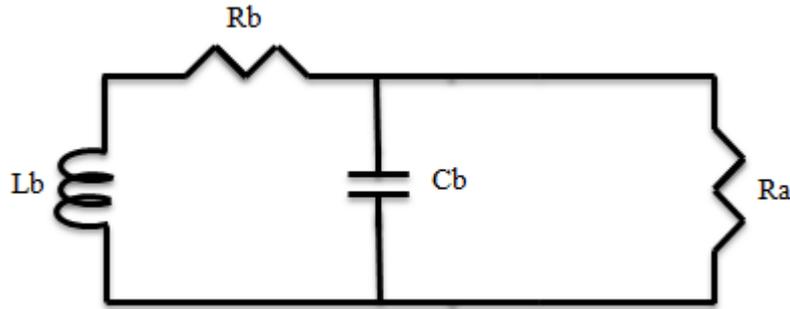


Figure 0.4: Circuit équivalent de l'oscillateur quasi-sinusoïdal

En exploitant les grandeurs électriques, nous obtenons l'équation différentielle suivante :

$$L.C_{eq} \frac{d^2U(t)}{dt^2} + (R_b C_b - \frac{L}{R_a}) \frac{dU(t)}{dt} + (1 - \frac{R_b}{R_a})U(t) = 0 \tag{0.2}$$

Cette équation est de la forme :

$$A \frac{d^2U(t)}{dt^2} + B \frac{dU(t)}{dt} + CU(t) = 0 \text{ Avec } A > 0 \tag{0.3}$$

En posant $Q = \frac{1}{R_b} \sqrt{\frac{L}{C_{eq}}}$. Dans ce cas, la fréquence de l'oscillateur vaut $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{A}}$ soit

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{Q^2}}{LC_{eq}}} \tag{0.4}$$

Au passage d'un véhicule, l'inductance L varie d'une valeur ΔL . En appliquant le différentiel logarithmique à f et en dérivant, nous trouvons : $\frac{df}{f} = -\frac{1}{2} \frac{dL}{L}$

Donc, la variation de la fréquence est équivalent à :

$$\frac{\Delta f}{f_{sans}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L_{sans}} = \frac{1}{2} S_{boucle} \tag{0.5}$$

X.1.3 L'électronique associée au câble piézoélectrique

L'usage d'un conditionneur électronique entre le câble piézoélectrique et le système de traitement modifie l'amplitude de la tension générée par le câble sans influencer sur sa forme.

X.1.3.1 Circuit équivalent du câble

Le câble piézoélectrique peut être modélisé par une source de tension associée en série à un condensateur en parallèle avec une résistance, comme indiqué sur la Figure 0.5.

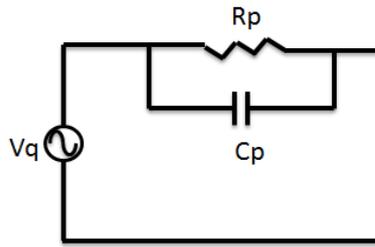


Figure 0.5: Circuit équivalent du câble piézoélectrique

La source électrique représente la tension générée. La résistance R_p représente les pertes ohmiques dans le câble. C_p représente la capacité diélectrique du matériau piézoélectrique.

X.1.3.2 Circuit équivalent de l'amplificateur de tension

Le circuit équivalent de l'amplificateur utilisé est donné par la Figure 0.6.

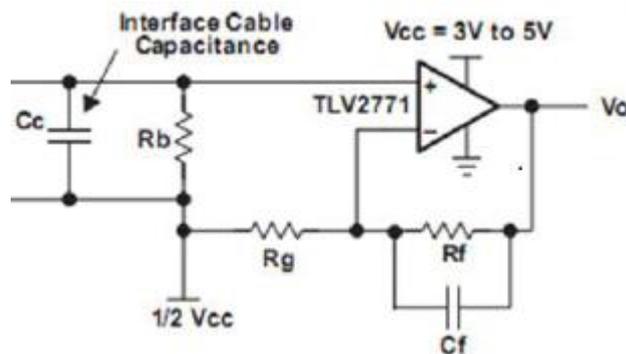


Figure 0.6: Circuit équivalent du câble piézoélectrique associé au détecteur électronique

Posons $C = C_p + C_c$, $R_b = R$ et négligeons la résistance du câble R_p et la capacité du circuit de contre réaction de l'amplificateur C_f . En utilisant le modèle en tension du capteur, le système équivalent est représenté par le schéma suivant :

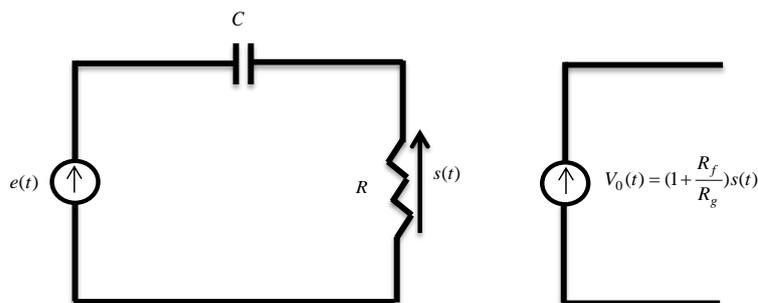


Figure 0.7: Modèle électronique équivalent

ANNEXES

La tension mesurée par le détecteur électronique dépend des valeurs de R_f et R_g . Elle est égale à :

$$V_a(t) = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)s(t) \quad (0.6)$$

$\left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right)$ représente le rapport entre la tension mesurée à la sortie de l'amplificateur et la tension générée par le câble piézoélectrique.

En connaissant les valeurs des deux résistances, on pourra déduire la valeur de la tension générée par le câble piézoélectrique.

X.2 Annexe 2 :

**L'acquisition des données de capteur hybride par le détecteur
MIXTRA de STERELA**

ANNEXES

Il s'agit d'un compteur de trafic conçu par la société STERELA. Le compteur MIXTRA est un analyseur de trafic permettant l'acquisition et l'enregistrement de tous types de données routières qu'il s'agisse d'analyses temporaires ou de recueils statistiques semi-permanents, le compteur MIXTRA gère trois types de capteurs :

- les tubes pneumatiques pour des comptages mobiles
- les boucles électromagnétiques pour des installations fixes
- les câbles piézoélectriques

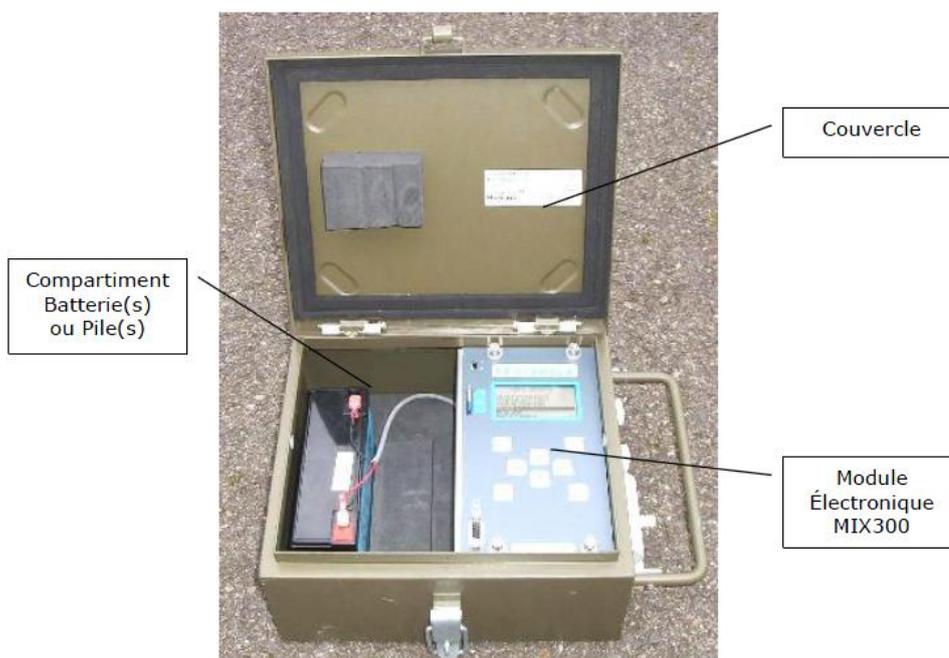


Figure 0.1: Compteur de trafic MIXTRA

Ce compteur est capable de fournir les mesures suivantes :

- Temps d'arrivée
- Amplitude (équivalent de la sensibilité)
- Silhouette (la différenciation des VL et des 2RM est difficile par ce compteur)
- Temps inter-véhicule
- Longueur
- Créneau de présence
- Vitesse

X.3 Annexe 4
Algorithmes

X.3.1 Algorithme pour récupérer les signaux du câble

Algorithme pour récupérer les signaux de câble

Entrées :

- Sc_seuil
- seuil_cable.

Sorties:

- i, c(i)
- cable (t,Sc)
- Cmax(t,Scmax)

// **Partie 1** : Création de l'axe de détection:

- 1: Lancer l'horloge et enregistre pour chaque instant la tension correspondante = [t, Sc] (étape = 0.01ms)
- 2: i = 0;

// **Partie 2** : Création du créneau de détection

- 3: Si un choc est détecté tel que S_c est supérieure à S_{c_seuil}
- 4: $i = i + 1$,
- 5: Déclenche l'horloge pendant seuil_cable et générer la variable $c(i) = [t, Sc]$
- 6: Fin si
- 7: Pour chaque choc détecté par le câble
- 8: Enregistrer la tension générée par la roue
- 9: Représenter graphiquement les réponses de chaque variable $c(i)$
- 10: Fin Si
- 11: i = 0;

// **Partie 3** : La valeur de la tension maximale dans chaque créneau

- 12: Pour chaque variable, (c (i))
- 13: Pour chaque instant (t)
- 14: Si la tension (Sc) en ce moment est supérieure à la tension à l'instant précédent
- 15: Enregistrer la tension et les instants correspondants in Cmax
- 16: Fin si
- 17: Fin pour
- 18: Fin pour

X.3.2 Algorithme pour récupérer les signaux des boucles

Algorithme pour récupérer les signaux de boucles

Entrées :

Sb0, Sb_ threshold,

Sorties:

j,

b(j),

loop (t,Sb)

bmax (t,Sbmax)

// Partie 1 : Génération de trois axes de détection

1: Pour chaque boucle (b1, b2, b3):

2: Déclencher l'horloge et enregistrer le S_b sensibilité qui correspond à chaque instant (pas= 1 ms)

3: b1 = [t, Sb1]

4: b2 = [t, Sb2]

5: b3 = [t, Sb3]

6: Fin Pour

// Partie 2 : Création de créneau de détection pour chaque boucle

7: Pour chaque boucle (b1, b2, b3):

8: Si la boucle est activée tel que Sb est supérieure à SB0

9: Enregistrer les valeurs de sensibilité ainsi les instants correspondants

10: Boucle (j) (t, Sb),

11: Tracer les réponses de chaque boucle variable (j)

12: Fin si

13: Fin pour

14: Enregistrer la valeur maximale de la sensibilité (bmax variable)

15: Pour chaque boucle variable (j)

16: Pour chaque instant

17: Si la sensibilité Sb est supérieure à la sensibilité à l'instant précédent

18: Stocker la sensibilité et le instants correspondants bmax

19: Fin si

20: Fin pour

21: Fin pour

// Partie 3 : Nombre de véhicules

22: Cars_number = Length (bmax)

23: Pour le premier et le second axe

24: S'il existe deux créneaux de détections situées sur les mêmes instants avec la même période

25: Cars_number = cars_number-1

26: Sinon

27: Cars_number = cars_number

ANNEXES

28: Fin si

29: Fin Pour

30: Pour le deuxième et le troisième axe

31: S'il existe deux créneaux de détections situées sur les mêmes instants avec la même période

32: Cars_number = cars_number-1

33: Sinon

34: Cars_number = cars_number

35: Fin si

36: Fin pour fin

XI. Bibliographie

- [1] [En ligne]. Available: <http://metramoto.pagesperso-orange.fr/>
- [2] Observatoire national interministériel de sécurité routière, «La sécurité routière en France: bilan de l'année 2008», la documentation française, Paris, 2009
- [3] [En ligne]. Available : «<http://www.securite-routiere.gouv.fr>»
- [4] [En ligne]. Available : «<http://metramoto.pagesperso-orange.fr>»
- [5] L. Maria, «Essais expérimentaux en site contrôlé, Paris: CETE Ile-de-France, 2013
- [6] B. GEROUDET, «Évaluation d'un dispositif permanent de détection des 2 roues motorisées dans le flux de circulation», Congrès ATEC TIS, Paris, 2015
- [7] SETRA-CETUR, «Sécurité des routes et des rues», 1992
- [8] SETRA, «Contrôle de sécurité des projets routiers (CSPR)», Audit avant mise en service, France, 2003
- [9] Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, «Les missions de la direction des routes», France, 2003
- [10] SETRA, «Catalogue des types de routes en milieu interurbain», France, 1991
- [11] Service d'études techniques des routes et autoroutes, «Aménagement des routes principales», France, 1994
- [12] J. ABDO, «Voiries et aménagements urbains en béton : conception et dimensionnement», France, Centre d'information sur le ciment et ses applications, 2009
- [13] J. Berthier, «Les routes-géométrie des routes», Techniques de l'ingénieur, 2011
- [14] SETRA, «Livre du maître de l'Instructions sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison», France, 2002
- [15] Institut Français d'information juridique, «Code de la voirie routière», France, 2014
- [16] [En ligne]. Available: «<http://www.legifrance.gouv.fr>»
- [17] [En ligne]. Available: «<http://www.autoroutes.fr/fr>»
- [18] L. MARIA, «Etude de systèmes de détection des deux-roues motorisés intégrés dans la

BIBLIOGRAPHIE

- chaussée», Université de Compiègne, Compiègne, 2011
- [19] [En ligne]. Available: «http://www.classic-garage.net/hosted_projects/123/index.php»
- [20] [En ligne]. Available: «http://www.matter-motorsport.fr/css/fr/img_chassistubulaire.jpg»
- [21] [En ligne]. Available: <http://www.r4-4l.com/>
- [22] E. Talange, «Châssis, carrosserie et sécurité», Académie de Nancy, France, 2003.
- [23] [En ligne]. Available: «www.mazda.com»
- [24] [En ligne]. Available: «<http://blogautomobile.fr/wp-content/uploads/2011/10/image002.jpg>»
- [25] Y. Akhmetov, «Contrôle Global de Châssis appliquée à la sécurité active des véhicules de distribution», L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2012
- [26] S. Kharrazi et R. Thomson, «Study of heavy truck accidents with focus on manoeuvres causing loss of control», Int. J. of Vehicle Safety, vol. 3, p. 32, 2008
- [27] M. Bouteldja, «Modélisation des interactions dynamiques poids lourd/infrastructures pour la sécurité et les alertes», Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, France, 2005
- [28] Certu, «La détection des 2RM dans le trafic», Décembre 2009. [En ligne].
- [29] Services d'études techniques des routes et autoroutes, «Les capteurs de trafic routier», France, 1995
- [30] J. Kell, I. Fullerton et M. Mills, «Traffic detector handbook», U.S. Department of transportation, 1990, USA
- [31] Y. PRABHAKAR, «Detection and counting of Powered Two Wheelers in traffic using a single-plane Laser Scanner», Rouen, 2013
- [32] Y. GOYAT, «Estimation précise des trajectoires de véhicule par un système optique», Clermont, 2008
- [33] Cete-NC, «La détection des deux-roues motorisés dans le trafic, quels systèmes, quels outils ?», Rouen, 2009
- [34] D. Middleton, H. Charara et R. Longmire, «Alternative vehicle detection technologies for traffic signal systems», Texas Department of Transportation, Research and Technology Implementation Office, Texas, 2009
- [35] E. Violette, «Powered two wheelers traffic measurement for road safety and risks

BIBLIOGRAPHIE

- assement», CETE Normandie-Centre, France, 2011
- [36] A. Tok, «Commercial Vehicle Classification System using Advanced Inductive Loop Technology», University of California, USA, 2008
- [37] D. Middleton, H. Charara et R. Longmire, «Alternative vehicle detection technologies for traffic signal systems», Texas Transportation Institute, USA, october 2008
- [38] L. A. Klein, M. K. Mills et D. Gibson, «Traffic Detector Handbook», 3rd éd, vol. 1, 2006
- [39] CEDRAT, «Flux 10.4», France, 2011
- [40] R. Clayton, «Inductance Loop and Partial», Édition WILEY, Canada, 2010
- [41] T. Wildi et G. Sybille, «Electrotechnique», de boeck université, Canada, 2004
- [42] [En ligne]. Available: «electronic hardware information, guides and tools»
- [43] M. K. Mills, «Inductive loop system equivalent circuit model», Vehicular Technology Conference, IEEE 39th, USA, 1989
- [44] P. Russeli et J. Smith, «Loop detector sensitivity variation due to burial depth», Department of transportation, Arizona, USA, 1987
- [45] H. Kerbouai, A. N'Diaye, D. Bouquain et S. Srairi, «Etude de formes de boucles électromagnétiques pour la détection des deux roues motorisés», TEC, n°220, pp. 61-66, France, 2013
- [46] M. Abramowitz et I. A. Stegun, «Handbook of Mathematical Functions», Vols. 1, Series 55, 595, National Bureau of standards Applied Mathematics, Washington, 1972
- [47] F. W. Grover, «The calculation of the mutual inductance of circular loops laments in any desired positions», Proceedings of the I.R.E, USA, 1944
- [48] F. W. Grover, «Inductance Calculations», New York, USA, 1964
- [49] STERELA, «Compteur de trafic routier MIXTRA», France, 2010
- [50] Measurement Specialties, «Roadtrax BL Piezoelectric Axle Sensor», Hampton, 2007
- [51] D. Berlincourt, D. Curran et H. Jaffe, «Piezoelectric and piezomagnetic materials and their function in transducers», Academic press INC, London, 1964
- [52] D. VASIC, «Apports des matériaux piézoélectriques pour l'intégration hybride et monolithique des transformateurs», Thèse doctorat, Cachan, 2013

BIBLIOGRAPHIE

- [53] M. Brissaud, «Matériaux piézoélectriques: Caractérisation, modélisation et vibration», Presses polytechniques et universitaires romandes, Lyon, France, 2007
- [54] D. Berlincourt, «Ultrasonic transducer materials : Piezoelectric crystals and ceramics», O.E. Mattiat Ed, Bedford, 1971
- [55] A. Parent, «Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants», Université de Paris-Sud, Paris, 2008
- [56] T. Ikeda, «Fundamentals of Piezoelectricity», Oxford Science Publication, Oxford, 1990
- [57] G. Sebald, «Nouveaux monocristaux à forte conversion piézoélectrique : croissance, modélisation et caractérisation», Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 2004
- [58] G. Douchet, «Contribution à l'étude des matériaux piézoélectriques de synthèse LGS et LGT pour des applications micro-résonateurs basse fréquence», UFC, Besançon, 2010
- [59] A. Qaiss, «Mise en oeuvre des films polymères cellulaires piézoélectriques», Université de Laval, Canada, 2010
- [60] F. S. Foster, K. Harasiewicz et M. Sherar, «A History of Medical and Biological Imaging with Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Transducers», IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 47, n° 16, 2000
- [61] L. GOUJON, «Etude des composites piézoélectriques 1.3 pour des applications electroacoustiques sous-marines», INSA de Lyon, France, 1999
- [62] M. DEFOSSEUX, «Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes», Université de Grenoble, France, 2011
- [63] J. Yong, «Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte raideur pour interfaces haptiques aéronautiques», Université de Toulouse 3 Paul Sebatier, Toulouse, 2013
- [64] W. SZLABOWICZ, «Contribution au dimensionnement et à la réalisation d'actionneur piézoélectrique à rotation de mode fort couple pour applications aéronautiques», Instiut national polytechnique de Toulouse, France, 2006
- [65] H. Nouira, «Contribution à la conception d'un microconvertisseur d'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique.», UFC, Besançon, 2008
- [66] STERELA, «Capteur piézoélectrique polymère», Toulouse, 2010
- [67] V. Masson, «Physical acoustics principles and methods», Academic press, London, 1964

BIBLIOGRAPHIE

- [68] A. Tok, «Commercial Vehicle Classification System using Advanced Inductive Loop Technology», University of California, Irvine, USA, 2008
- [69] S. G. Burns, «In-Situ Vehicle Classification Using an ILD and a Magnetoresistive Sensor Array», Intelligent Transportation Systems Institute, Minnesota, USA, 2009
- [70] P. Boissoles, «à propos des intégrales elliptiques», 2005
- [71] R. H. Brown, «Properties of Piezo Cable», USA, 2001
- [72] L. Maria, «Etude de systèmes de détection des deux-roues motorisés intégrés dans la chaussée», Université de technologie de Compiègne, 2011
- [73] Observatoire national interministériel de sécurité routière, «La sécurité routière en France: Bilan de l'année 2008», Paris, 2009
- [74] Images SI Inc, «Piezo Film Sensors», Staten Island
- [75] Centre d'Études techniques de l'Équipement, «La détection des deux-roues motorisé dans le trafic, quels systèmes, quels outils», France, 2010
- [76] D. L. woods, «Texas traffic signal detector manual», Texas State Departement of Highways and public transportation, Texas, USA, 1991
- [77] S. Babic, F. Sirois et C. Akyel, «Validity check of mutual inductance formulas for circular filaments with lateral and angular misalignments», Progress In Electromagnetics Research M, vol. 8, pp. 15-26, 2009
- [78] C. Akyel, S. I. Babic et M. Mahmoudi, «Mutual inductance calculation for non-coaxial circular air coils with parallel axes», Progress In Electromagnetics Research, vol. 91, pp. 287-301, 2009
- [79] P. Boissoles et G. Caloz, «Accurate Calculation of Mutual Inductance and Magnetic Fields in a Birdcage Coil», 2006
- [80] M. Dobbie, «Calculation of inductance», Radiotron Designer's Handbook, Australie
- [81] M. T. Thompson, «Inductance Calculation Techniques», USA, 1999
- [82] Y. Dantal et M. Rondeau, «Librairie Algorithmique», 2004
- [83] A. Queiroz, «Mutual inductance and inductance calculations by Maxwell's method», 2003
- [84] C. L. W. Sonntag, E. A. Lomonova et J. L. Duarte, «Implementation of the Neumann Formula for Calculating the Mutual Inductance between Planar PCB Inductors»,

BIBLIOGRAPHIE

Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008

- [85] P. Russeli et J. Smith, «Loop detector sensitivity variation due to burial depth», Arizona Department of Transportation, USA, 1987
- [86] S. I. Babic, F. Sirois et C. Akyel, «Validity check of mutual inductance formulas for filaments with lateral and angular misalignments», Progress In Electromagnetics Research, 2009

Résumé

Depuis plusieurs années les chiffres de l'insécurité routière montrent la nécessité de développer un outil technologique qui vise à connaître le comportement de véhicules deux roues motorisés (2RM) afin d'améliorer leur sécurité. De cette problématique découle nos travaux de recherche qui s'inscrivent dans le cadre de projet METRAMOTO (MESure du TRAFic des deux-roues MOTORisés pour la sécurité routière et l'évaluation des risques). L'objectif principal visé concerne la modélisation, le dimensionnement et l'optimisation d'un capteur hybride constitué d'une part de boucles électromagnétiques et d'autre part de capteurs de chocs piézo-électriques. L'idée consiste à utiliser les boucles électromagnétiques pour discriminer la présence des 2RM de celle des autres véhicules, associées à des segments piézo-électriques pour détecter le choc produit par le passage des roues des différents véhicules, le tout associé à un algorithme de gestion et de traitement de données. Aujourd'hui le dimensionnement des systèmes de détection à base de boucles électromagnétiques ou de câble piézo-électrique se fait de manière expérimentale sur des sites contrôlés en utilisant plusieurs types de véhicules. Cette technique gourmande en temps nécessite une série importante d'essais coûteux et dangereux. La présente étude a pour but de modéliser les différentes interactions entre le capteur hybride étudié et les véhicules en vue de son dimensionnement. Des modèles électromagnétiques et électromécaniques sont développés pour décrire les différentes interactions se produisant entre les boucles électromagnétiques d'une part, les boucles électromagnétiques et les véhicules d'autre part ainsi que celles des roues de véhicules et le câble piézoélectrique. Sur la base de ces modèles établis, une démarche générale est élaborée conduisant au dimensionnement du capteur hybride pour une route donnée. Nous nous sommes également intéressés au traitement des données issues du capteur hybride pour lesquelles nous proposons une approche d'identification des différentes catégories de véhicules dont les 2RM. Deux configurations de capteurs pour deux routes différentes sont alors proposées. Elles sont associées à des algorithmes de traitement de données permettant l'acquisition des signaux de boucles et de câbles, la distinction des différents types de véhicules, l'estimation de la position des véhicules sur la chaussée ainsi que la mesure de la vitesse de véhicules.

Mots clés : trafic, capteur hybride, boucles électromagnétiques, câble piézoélectriques, modélisation électromagnétique, modélisation électromécanique, deux roues motorisés (2RM), véhicule léger (VL), poids lourd (PL), véhicule urbain (VU), autocar, autobus, identification, détection, FLUX3D.

Abstract:

For several years the road safety numbers show the need to develop a technological tool that aims to know the powered two wheelers vehicles behavior (2PW) to improve their security. From this problematic arise our research works that come under the project METRAMOTO (Powered two wheelers traffic measurement for road safety and risks assessment). The main objective is modeling, sizing and optimization of an hybrid sensor consisted of electromagnetic loops and piezoelectric shock sensors. The idea is to use electromagnetic loops to discriminate the 2PW presence from the other vehicles, combined with piezoelectric segments to detect the shocks produced by the vehicles wheels passage, all associated with a management algorithm and data processing. Today the sizing of the detection systems based on electromagnetic loops or piezoelectric cables is done experimentally on controlled sites using several vehicles types. This technique requires significant test series which are costly and dangerous. This study aims to modeling the different interactions between the studied sensor and vehicles in order to its sizing. Electromagnetic and electromechanical models are developed to describe the different interactions that take place between electromagnetic loops on the one hand, between electromagnetic loops and vehicles on the other hand and those between vehicle wheels and piezoelectric cable. On the basis of established models, a general approach is elaborated driving to sizing the hybrid sensor for any given road. We are also interested to the data processing coming from the hybrid sensor for which we propose an approach to identifying the different vehicle categories including the 2PW. Two sensor configurations for two different roads are then proposed. They are associated at data processing algorithms allowing the acquisition of loops and cables signals, the distinction between the different vehicles classes, the estimation of the vehicles positions on the road and the measuring of their speed.

Keywords: traffic, hybrid sensor, electromagnetic loop, piezoelectric cable, electromagnetic modeling, electromechanical modeling, powered two wheelers (2PW), light-duty vehicle, heavy-duty vehicles, bus, identification, detection, FLUX3D.

The logo for the SPIM doctoral school, featuring the letters 'S', 'P', 'I', and 'M' in a stylized, white, sans-serif font. The 'S' is the largest and most prominent, with the other letters stacked to its right.