



**HAL**  
open science

# Contribution au développement de systèmes d'aide à la conduite : cas des poids lourds et des deux roues motorisés

Hocine Imine

► **To cite this version:**

Hocine Imine. Contribution au développement de systèmes d'aide à la conduite : cas des poids lourds et des deux roues motorisés. Automatique / Robotique. UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 2012. tel-00869342

**HAL Id: tel-00869342**

**<https://theses.hal.science/tel-00869342>**

Submitted on 3 Oct 2013

**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.

# Mémoire

Présenté à

**l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis**

Par

**Hocine Imine**

Pour

**l'Habilitation à Diriger des Recherches**

Spécialité : **Automatique et Robotique**

---

**Contribution au développement de systèmes d'aide à la  
conduite : cas des poids lourds et des deux roues motorisés**

---

Soutenue le 13 Mars 2012

Devant le jury Composé de :

J. Ragot	Professeur, INPL, Nancy	Rapporteur
W. Perruquetti	Professeur, EC, Lille	Rapporteur
A. Charara	Professeur, UTC, Compiègne	Rapporteur
B. D'Andréa-Novel	Professeur, Ecole des Mines de Paris	Examineur
D. MEIZEL	Professeur, ENSIL, Limoges	Examineur
L. Dugard	Directeur de Recherche CNRS	Examineur
S. Mammar	Professeur, IUP, Evry	Examineur
L. Fridman	Professeur, UNAM, Mexico	Examineur
M. Djemai	Professeur, LAMIH, Valenciennes	Directeur
B. Favre	Directeur de Recherche, Renault Trucks	Invité



*La théorie c'est quand on sait tout et rien ne fonctionne.  
La pratique c'est quand tout fonctionne et personne ne sait pourquoi.*

*Victor Hugo*

*A mes chers parents*

*A Amel, A notre petit lionceau, Ghiles*



## Remerciements

---

Je tiens à remercier très chaleureusement Messieurs José Ragot, Professeur à l'INPL de Nancy, Ali Charara, Professeur à l'UTC de Compiègne et Wilfrid Perruquetti, Professeur à l'EC de Lille, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail en acceptant d'être les rapporteurs de mon HDR.

Je remercie Madame Brigitte D'Andréa-Novel, Professeur à l'Ecole des Mines de Paris, ainsi que Messieurs Dominique Meizel, Professeur à l'ENSIL de Limoges, Luc Dugard, Directeur de Recherche au CNRS, ainsi que Monsieur Bernard Favre, Directeur de Recherche chez Renault Trucks pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie tout particulièrement Saïd Mammari, Professeur à l'IUP d'Evry et directeur du Laboratoire IBISC, pour les précieux conseils qu'il m'a prodigués et l'attention et le sérieux avec lesquels il a suivi de plus près mes travaux.

Que dire de Leonid Fridman, Professeur à l'Université UNAM de Mexico, si ce n'est de lui exprimer toute ma gratitude pour sa disponibilité, pour son soutien permanent et la qualité des relations scientifiques et humaines qu'il sait entretenir.

Je remercie vivement Monsieur Mohamed Djemai, Professeur à l'Université de Valenciennes, pour son aide inestimable et les conseils précieux qu'il m'a apportés et qui m'ont permis de finaliser au mieux ce travail.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu durant mon travail et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation (ils se reconnaîtront). Qu'ils trouvent ici mes remerciements les plus sincères.

Je tiens enfin à exprimer ma gratitude à tous les membres de ma famille pour leur compréhension profonde et leur soutien constant. A mes parents, à tous leurs efforts et sacrifices. Je ne saurais remercier suffisamment ma femme Amel, pour son soutien et qui a toujours su trouver les mots justes et réconfortants dans les moments difficiles.



---

# Table des matières

---

Liste des figures	vii
Avant propos	1
<b>Curriculum Vitae</b>	<b>3</b>
0.1 État civil . . . . .	3
0.2 Déroulement de carrière . . . . .	3
0.3 Langues pratiquées . . . . .	3
0.4 Diplômes et titres universitaires . . . . .	4
0.5 Stages et formations suivies . . . . .	4
<b>Abréviation et Terminologies</b>	<b>5</b>
0.6 Projets de recherche et autres terminologies . . . . .	5
0.7 Organismes d'enseignement et de recherche . . . . .	6
0.8 Terminologies automobiles, deux roues motorisés, poids lourds . . . . .	7
<b>I Activités de recherche, enseignement, et responsabilités</b>	<b>8</b>
<b>1 Activité de recherche</b>	<b>9</b>
1.1 Activités antérieures: DEA et thèse . . . . .	9
1.2 Activités actuelles . . . . .	10
<b>2 Activité d'encadrement</b>	<b>13</b>
2.1 Encadrement de Post-Doctorants . . . . .	13
2.2 Encadrement de doctorants . . . . .	15
2.3 Encadrement de Master 2 . . . . .	19
<b>3 Activité d'enseignement</b>	<b>23</b>
3.1 Télécommunication . . . . .	24
3.1.1 Théorie et traitement du signal . . . . .	24

3.1.2	Transmission à bande de base et caractérisation du canal de transmission . . . . .	24
3.2	Architecture des Microprocesseurs . . . . .	25
3.3	Automatique . . . . .	25
3.4	Dynamique du véhicule . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Administration de la recherche</b>	<b>27</b>
4.1	Responsabilités administratives . . . . .	27
4.2	Responsabilités de projets . . . . .	28
4.2.1	Projet VIF . . . . .	31
4.2.2	Projet Heavyroute . . . . .	33
4.2.3	Opération de recherche PLINFRA . . . . .	35
4.3	Responsabilités de sous-traitances et contrats de recherche . . . . .	36
4.4	Organisation de manifestations . . . . .	36
4.5	Participation à des groupes de recherche . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Rayonnement</b>	<b>39</b>
5.1	Invitation et sélection . . . . .	39
5.2	Participation à des Jurys de thèses et comités de suivi . . . . .	40
5.2.1	Participation à des Jurys de thèses . . . . .	40
5.2.2	Membre de comités de suivi de thèses . . . . .	40
5.3	Relecture d'articles . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Coopérations nationales et internationales</b>	<b>43</b>
6.1	Coopérations nationales . . . . .	43
6.2	Coopérations internationales . . . . .	44
<b>II</b>	<b>Synthèse des activités de recherche</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Etude et maîtrise des risques de perte de contrôle des poids lourds</b>	<b>49</b>
7.1	Introduction . . . . .	49
7.2	Étude du comportement du PL et adaptation de sa conduite . . . . .	51
7.2.1	Contribution à la modélisation du PL/Infrastructure . . . . .	51
7.2.2	Validation des modèles . . . . .	55
7.2.3	Interaction PL/infrastructure et adaptation de la conduite du PL . . . . .	56
7.2.3.1	Communication PL/Infra et échange d'information . . . . .	56

7.2.3.2	Gestion d'interdistance . . . . .	58
7.3	Amélioration de la sécurité des poids lourds: développement de dispositifs embarqués et d'alertes pour l'aide à la conduite des PL . . . . .	60
7.3.1	Observation, estimation et prédiction du risque . . . . .	62
7.3.1.1	Approche déterministe . . . . .	62
7.3.1.2	Approche probabiliste . . . . .	71
7.3.2	Identification des incertitudes . . . . .	80
7.3.2.1	Identification des perturbations . . . . .	82
7.3.2.2	Identification des paramètres . . . . .	82
7.3.3	Contrôle actif . . . . .	82
7.3.3.1	Renversement . . . . .	85
7.3.3.2	Sortie de voie . . . . .	87
7.4	Caractérisation de l'infrastructure et impact sur la sécurité routière des PL	87
7.5	Conclusion . . . . .	91
<b>8</b>	<b>Pesage dynamique et embarqué des PL</b>	<b>93</b>
8.1	Introduction . . . . .	93
8.2	Développement d'un système économique et fiable de pesage embarqué dans les poids lourds . . . . .	94
8.2.1	Synthèse de l'observateur à modes glissants et estimation des forces d'impact . . . . .	95
8.2.2	Validation expérimentale . . . . .	97
8.2.2.1	Validation sur un véhicule à l'arrêt . . . . .	98
8.2.2.2	Validation sur un manège de fatigue . . . . .	99
8.3	Applications du pesage embarqué: contrôle hybride . . . . .	100
8.4	Conclusion . . . . .	102
<b>9</b>	<b>Etude du comportement des deux roues motorisés</b>	<b>105</b>
9.1	Introduction . . . . .	105
9.2	Modélisation des deux roues motorisés . . . . .	106
9.2.1	Etat de l'art . . . . .	107
9.2.2	Contribution à la modélisation d'un deux roues motorisé . . . . .	113
9.2.2.1	Modélisation du comportement dynamique du pneumatique	113
9.2.2.2	Couple moteur . . . . .	119
9.2.2.3	Couple de freinage . . . . .	120
9.2.2.4	Forces aérodynamiques . . . . .	120

9.2.2.5	Modélisation de la chaussée . . . . .	121
9.3	Instrumentation et développement d'une moto robotisée . . . . .	121
9.3.1	Modification effectuées sur la moto . . . . .	122
9.3.1.1	Modifications sur le châssis . . . . .	122
9.3.1.2	Automatisation des commandes . . . . .	122
9.4	Développement d'outils pour le contrôle de trajectoires . . . . .	124
9.5	Conclusion . . . . .	125
<b>III</b>	<b>Liste des productions</b>	<b>127</b>
<b>10</b>	<b>Liste des logiciels</b>	<b>129</b>
<b>11</b>	<b>Publications et communications</b>	<b>131</b>
11.1	Ouvrages . . . . .	131
11.2	Articles dans des revues à comité de lecture . . . . .	131
11.3	Articles soumis à des revues à comité de lecture . . . . .	132
11.4	Communications à des congrès à comité de lecture et actes . . . . .	133
11.5	Communications soumises à des congrès à comité de lecture et actes . . . . .	137
11.6	Revue technico-professionnelles . . . . .	138
11.7	Communications sans actes . . . . .	138
11.8	Séminaires . . . . .	138
11.9	Rapports de recherche . . . . .	138
<b>IV</b>	<b>Conclusion générale et perspectives</b>	<b>141</b>
<b>12</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>143</b>
<b>13</b>	<b>Perspectives</b>	<b>147</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>151</b>
	<b>Annexes</b>	<b>167</b>
<b>A</b>	<b>Modèle dynamique PL: description de matrices</b>	<b>169</b>

---

# Liste des figures

---

1.1	Recherche appliquée aux VL, aux PL et aux deux roues motorisées . . . . .	11
3.2	Tableau récapitulatif des enseignements assurés . . . . .	23
4.3	Architecture globale du système 'VIF' . . . . .	31
4.4	Schéma descriptif du projet Heavyroute . . . . .	33
4.5	Principe de calcul de la vitesse recommandée . . . . .	34
4.6	Experimentation du site SAROT . . . . .	34
7.7	Tracteur semi-remorque . . . . .	51
7.8	Modèle de tracteur semi-remorque . . . . .	52
7.9	Description du modèle de suspension du PL . . . . .	53
7.10	Expérimentation en vue de la validation du logiciel PROSPER . . . . .	55
7.11	Communication Véhicule et système WIM : (1) Identification du véhicule, (2) Dialogue Véhicule et le système WIM, (3) Fin de communication . . . . .	57
7.12	Le panneau modifié selon l'expérimentation . . . . .	59
7.13	Description de l'expérimentation . . . . .	59
7.14	Répartition des accidents mortels selon le type de véhicules impliqués . . . . .	60
7.15	Système de prédiction de renversement . . . . .	63
7.16	Exemple de vitesse recommandée calculée par le système de prédiction du risque . . . . .	64
7.17	Le tracteur instrumenté . . . . .	66
7.18	Les capteurs embarqués dans le véhicule . . . . .	67
7.19	Positionnement des capteurs dans le véhicule . . . . .	67
7.20	Test de chicane en situation réelle . . . . .	68
7.21	Estimation des débattements de suspension avant gauche et avant droit . . . . .	68
7.22	Estimation de la hauteur du centre de gravité . . . . .	69
7.23	Estimation des forces verticales avant gauche et avant droite . . . . .	70
7.24	Transfert de charge à l'avant du tracteur . . . . .	70
7.25	Schéma de conception du modèle empirique du risque . . . . .	73
7.26	Exemple de calcul de fiabilité dans un espace aléatoire à deux dimensions . . . . .	74

7.27	Etat limite et approximation de la probabilité de défaillance . . . . .	76
7.28	Les variables considérées dans l'étude de sensibilité . . . . .	79
7.29	Coefficient de variation du LTR (en %) en fonction des coefficients de variation des paramètres . . . . .	80
7.30	Trajectoires du super twisting algorithm . . . . .	83
7.31	Diagramme de contrôle . . . . .	83
7.32	Vue latérale du modèle du PL . . . . .	84
7.33	APL: Analyseur de Profil en Long . . . . .	88
8.34	Véhicule instrumenté . . . . .	98
8.35	Vérin hydraulique excitant le véhicule . . . . .	98
8.36	Tandem de ALF . . . . .	99
8.37	Vue latérale de ALF . . . . .	99
8.38	Description du contrôleur hybride . . . . .	101
9.39	Shéma d'un deux roues motorisées . . . . .	107
9.40	Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp (1971) . . . . .	108
9.41	Représentation du modèle de Sharp (1994) . . . . .	111
9.42	Représentation du modèle de Sharp (2001) . . . . .	112
9.43	Schématisation multi-corps du modèle dynamique de la moto . . . . .	114
9.44	Forces au contact pneumatique chaussée . . . . .	114
9.45	Force latérale en fonction de l'angle de dérive . . . . .	115
9.46	Représentation de l'angle de carossage . . . . .	116
9.47	Angles de dérive dans le cas d'un modèle à deux roues . . . . .	116
9.48	Représentation de la chasse pneumatique . . . . .	118
9.49	Résultat du tracé de la formule de Pacejka . . . . .	119
9.50	Exemple de cartographie du champ moteur . . . . .	120
9.51	Aprilia Mana 850 après modifications . . . . .	122
9.52	Aprilia Mana 850 avec roues latérales . . . . .	123
9.53	Moteur Harmonic Drive . . . . .	123
9.54	Modèle de la mtoto automatisée . . . . .	124

---

# Avant propos

---

Une synthèse de mes activités scientifiques et pédagogiques est présentée dans ce document. Elle résume le déroulement de ma carrière de chargé de recherche depuis ma nomination en février 2005 au sein du Laboratoire Central des Ponts et chaussées (LCPC), devenu aujourd'hui IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) depuis sa fusion avec l'INRETS (l'Institut de Recherche sur les Transports et leur Sécurité).

En effet, après une thèse de doctorat soutenue en 2003, qui portait sur la dynamique du véhicule et estimation des entrées inconnues issues de la chaussée, et sept années en tant que chargé de recherche, j'ai décidé cette année de franchir le pas et passer mon HDR.

Ma motivation est double. D'abord, parce que je me sens aujourd'hui prêt à la vue de mon parcours, comme cela est précisé dans mon rapport d'évaluation de chercheurs établi par le comité d'évaluation des chercheurs du ministère. Ensuite il est important pour la suite de ma carrière d'avoir la reconnaissance de mes pairs, qui est sanctionnée par une Habilitation à Diriger des Recherches. Ceci m'aiderait sans doute à avancer dans ma réflexion scientifique et dans mon processus de maturation intellectuelle.

Durant ces dernières années, j'ai développé un axe de recherche, autour des systèmes d'aides à la conduite appliqués, dans un premier temps aux poids lourds et plus récemment aux deux roues motorisés suite à la création de l'UMR, LEPSIS.

Nous pouvons diviser mes activités de recherche en 3 grandes thématiques :

1. Etude et maîtrise des risques de perte de contrôle des poids lourds (PL) pour la sécurité routière

- Etude du comportement du PL et adaptation de sa conduite,
- Amélioration de la sécurité des poids lourds : développement de dispositifs embarqués et d'alertes pour l'aide à la conduite des PL,
- Caractérisation de l'infrastructure et impact sur la sécurité routière des PL.

2. Pesage dynamique et embarqué des PL

- Développement d'un système économique et fiable de pesage embarqué dans les poids lourds,

- Applications du pesage embarqué: contrôle hybride.
- 3. Etude du comportement des deux roues motorisés
  - Modélisation des deux roues motorisés,
  - Instrumentation et développement d'une moto robotisée,
  - Développement d'outils pour le contrôle de trajectoires.

Parallèlement à ces activités de recherche, j'ai encadré un certain nombre de chercheurs, stagiaires de Master 2, de doctorants et de post-doctorants et j'ai participé aux montages et au suivi de projets de recherche.

Sur le plan de l'enseignement, j'ai régulièrement assuré des fonctions de vacataire dans des universités et écoles d'ingénieurs, dans les domaines du traitement du signal, de l'automatique linéaire et non linéaire, architecture des microprocesseurs, télécommunication...etc. J'ai occupé en 2004 le poste d'ATER (Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche) à l'Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines.

Ce mémoire est composé de quatre parties. Dans la première, je présente mes activités de recherche, d'encadrement, d'enseignement ainsi que mes responsabilités dans les différents projets auxquels j'ai pris part. Dans la seconde partie, je développe mes activités de recherche et dans la partie trois, je liste les différentes productions, en logiciels et en communications déjà parues, en cours de publication ou en cours de révision. Enfin, en dernière partie, je donne quelques conclusions et des perspectives à mes travaux de recherche actuels et futurs.

---

# Curriculum Vitae

---

## 0.1 État civil

Nom	Imine
Prénom	Hocine
Date et lieu de naissance	09 Juin 1973, Tizi-ouzou, Algérie
Situation familiale	Marié, 1 enfant
Adresse personnelle	6 rue Georges Bouzerait, 92120, Montrouge
Corps - grade	Chargé de recherche 1ère classe
Organisme d'affectation	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR)
Unité de recherche/service	Infrastructure et Mobilité (IM)/Laboratoire d'Exploitation Perception, Simulateurs et Simulations (LEPSIS)
Dates d'affectation	01/02/2005
Adresse professionnelle	58 Boulevard Lefebvre, 75732, Paris 15 E-Mail: <a href="mailto:hocine.imine@ifsttar.fr">hocine.imine@ifsttar.fr</a> Tél: 01 40 43 53 56 Page web: <a href="http://perso.lcpc.fr/imine.hocine">http://perso.lcpc.fr/imine.hocine</a>

## 0.2 Déroulement de carrière

Depuis Février 2005	Chargé de recherche 1ère classe, IFSTTAR
2003-2004	Attaché temporaire d'enseignement et de recherche (ATER) Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines
2000-2003	Allocataire de recherche, LCPC

## 0.3 Langues pratiquées

Anglais, Allemand, Arabe, Italien (parlé)

## 0.4 Diplômes et titres universitaires

- 2003 Thèse de doctorat en robotique, Université de Versailles, Mention: Très honorable  
 Titre: Observation d'états d'un Véhicule pour l'estimation du profil dans les traces du roulement  
 Encadrement: Y. Delanne (LCPC) et N. K. M'sirdi (LRP, LRV)  
 Membres du jury:  
 W. Khalil Professeur, Université de Nantes, IRCCYN, président  
 S. Mammar Professeur, IUT d'Evry, rapporteur  
 X. Moreau Professeur, Université de Bordeaux I, rapporteur  
 A. Charara Professeur, UTC de Compiègne, examinateur  
 N.K. M'Sirdi Professeur, Université de Versailles, examinateur  
 Y. Delanne Directeur de Recherche, LCPC, examinateur  
 L. Laval Maître de Conférences, Université de Paris 13, invité
- 2000 Diplôme d'étude approfondie (DEA), Mention: A. bien
- 1996 Ingénieur d'état en électronique: option contrôle, Université de Tizi-Ouzou Algérie  
 Mention: Très bien

## 0.5 Stages et formations suivies

Année	Intitulé	Organisme	Durée
2010	Sauveteur Secouriste du travail-recyclage	APAVE	07 heures
2008	Sauveteur Secouriste du travail-recyclage	APAVE	07 heures
2007	Sauveteur Secouriste du travail	SOCOTEC	24 heures
	Dynamique longitudinal du véhicule	INSA Lyon	24 heures
2006	Sécurité probabiliste des structures	Collège Polytechnique	42 heures
	Manager son activité	DEMOS	16 heures
2005	Animer une réunion	DEMOS	16 heures
	Management de projet-2 parties	DEMOS	32 heures
	Logiciel dynamique PROSPER	CERA-CD	24 heures
	Dynamique du Véhicule	INSA Lyon	87 heures
2000	Méthode de relevé 2D de profil de chaussée	LCPC/LRP	6 mois
1999	Electronique et système de régulation	SCHINDLER, Suisse	6 mois
1998	Conception de circuits intégrés et imprimés	ASCOM, Suisse	3 mois
1996	Estimation, filtrage et détection des modes des fonctions de densités de probabilités	Université de Tizi-ouzou Algérie	6 mois

---

# Abréviation et Terminologies

---

## 0.6 Projets de recherche et autres terminologies

ARCOS	Actions de Recherche pour la COnduite Sécurisée
ATER	Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche
CALFRANCE	Collaboration entre la Californie et la France
CDD	Contrat à Durée Déterminée
DIVINE	Dynamic Interaction between Vehicles and Infrastructure Experiment
DEA	Diplôme d'Etudes Approfondies
GESPER	GÉstion préventive de la vitesse pour améliorer la Sécurité des PL et leur Economie en lien avec l'infrastructure Routière
HEAVYROUTE	Projet européen Heavy Route
HPWIM	High Precision Weigh-In-Motion
HVWD	Heavy Vehicle Weights and Dimensions
IRVT	Intelligent Road Vehicles Train
JJCR	Journées Jeunes Chercheurs en Robotique
OR	Opération de Recherche
PCRD	Programme Cadre en Recherche et Développement
PLINFRA	Poids Lourds Infrastructure
SIMACOM	SIMulateur pour l'Apprentissage de la COnduite de 2 roues Motorisés
TRUCKS	Opération de recherche Trucks
VIF	Véhicule Interactif du futur
WAVE	Weighing in motion of Axles and Vehicles for Europe

## 0.7 Organismes d'enseignement et de recherche

ANR	Agence Nationale de Recherche
ARRB	Australian Road Research Board
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CEMIF	Centre d'Etudes Mécaniques d'Ile de France
CETE	Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNSR	Conseil National de Sécurité Routière
CNU	Conseil National des Universités
DESE	Division Exploitation, Signalisation, Eclairage du LCPC
DGMT	Direction Générale de la Mer et des Transports
ENSAM	Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers
ENSTA	Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées
ERA	Equipe de Recherche Associée
FCE	Fonds de Compétitivité des Entreprises
FUI	Fonds Unique Interministériel
GDR	Groupe De Recherche
IBISC	Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes
IEF	Institut d'Electronique Fondamentale
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
INRETS	Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
IUP	Institut Universitaire Professionalisé
IUT	Institut Universitaire de Technologie
LAGIS	Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LEPSIS	Laboratoire d'Exploitation, Perception, Simulateurs et Simulations
LIVIC	Laboratoire sur les Interactions Véhicules-Infrastructure-Conducteurs
LRPC	Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées
LSC	Laboratoire des Systèmes Complexes
LUTB	Pôle de compétitivité Lyon Urban Truck&Bus
L2S	Laboratoire Signaux et Systèmes
MACS	Modélisation, Analyse et Conduite des Systèmes Dynamiques
MEDAD	Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables
MEEDM	Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer

MSIS	Unité de Recherche Modélisation, Simulation et Simulateurs de l'INRETS
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Economiques
ONISR	Observatoire Nationale Interministériel pour la Sécurité Routière
PCRD	Programme Cadre Recherche et Développement (Communauté Européenne)
PREDIT	Programme de REcherche et D'Innovation dans les Transports
UEVE	Université d'Evry Val d'Essonne
UMLV	Université de Marne La Vallée
UMR	Unité Mixte de Recherche
USTL	Université des sciences et Technologies de Lille
UVHC	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
UVSQ	Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines

## 0.8 Terminologies automobiles, deux roues motorisés, poids lourds

ABS	Anti Lock Brake System
ACC	Adaptative Cruise Control
ALF	Accelerated Load Facility
APL	Analyseur de Profil en Long
APT	Air Pressure Transducer (capteur de pression d'air)
DDL	Degrés De Liberté
EBS	Electronic Braking System
EMS	European Modular System
ESP	Electronic Stability Program
GPS	Global Positioning System
ITS	Intelligent Transport Systems
LTR	Load Transfer Ratio
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (capteur de déplacement linéaire)
PL	Poids Lourd
PTRA	Poids Total Roulant Autorisé
2RM	Deux Roues Motorisées
SIREDO	Système Informatisé de REcueil de DONnées
TTR	Time To Rollover
VL	Véhicule Léger
WIM	Weigh In Motion

## Partie I

# Activités de recherche, enseignement, et responsabilités

---

# Chapitre 1

## Activité de recherche

---

Ce chapitre présente une synthèse de mes activités de recherche depuis mon DEA entamé en 1999 jusqu'à mes activités actuelles que j'effectue en tant que chargé de recherche au sein de IFSTTAR.

### 1.1 Activités antérieures: DEA et thèse

Après un stage de DEA effectué en collaboration entre le Laboratoire de Robotique de Paris et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées qui a porté sur le développement d'une méthode de relevé  $2D$  de profil de chaussée, qu'on a validé sur une remorque avec la suspension arrière d'une *Renault 21*, ma thèse de doctorat réalisée dans le cadre de cette même collaboration, a consisté à appliquer l'automatique à l'automobile et à l'interaction véhicule avec la route afin de caractériser une surface de chaussée. C'est une recherche qui associait études théoriques et évaluations expérimentales. Afin de concevoir une méthode de relevé  $3D$  des surfaces de chaussée, nous avons réduit en première approche cette méthode en un problème  $2 \times 2D$ .

Pour reconstruire ce profil, des méthodes géométriques de changement de repères ont été développées. Elles consistaient à exploiter les mesures obtenues à partir d'un véhicule instrumenté.

Cette approche a permis de développer un estimateur de profil de route, rapide, précis et économique. Elle utilise le principe des observateurs non linéaires robustes par modes glissants à entrées inconnues, partant des mesures disponibles sur les débattements et les vitesses afin d'estimer les deux profils, droit et gauche, parcourus par les roues du véhicule.

Nous avons au préalable étudié la faisabilité de ce principe d'estimation sur une remorque instrumentée à l'arrêt. Des signaux d'excitation de la remorque, constituant les entrées inconnues sont générés et comparés à ceux reconstitués par la méthode développée. Nous avons pu remarquer que l'estimation était de qualité.

Cependant, afin de remonter vers un profil 3D de la chaussée, les quatre traces de roulement du véhicule sur la route étaient nécessaires. C'était l'objet de mon travail de thèse.

La mise au point d'un tel estimateur a nécessité le développement d'un modèle dynamique complet du véhicule. Nous avons donc dans un premier temps, développé un modèle du véhicule constitué de *32ddl* (degrés de liberté) pour représenter au mieux le comportement du véhicule. Cette modélisation a nécessité l'utilisation des techniques de la robotique (méthode de Lagrange), puisqu'on a découpé le système en cinq sous blocs. Après avoir réalisé et simulé le modèle sous le logiciel de calcul Matlab-Simulink, une deuxième étape consistait à valider celui-ci sur des mesures réelles obtenues sur la piste du LCPC à Nantes avec un véhicule instrumentée de type Peugeot 406 . Cette campagne d'essais a permis de mesurer et d'enregistrer la dynamique du véhicule, accélérations, vitesses et positions. Cette validation du modèle est précédée par une étape intermédiaire qui est celle du traitement des signaux délivrés par les capteurs afin d'enlever les bruits et de rendre ces signaux plus cohérents et exploitables.

Pour estimer les quatre traces de roulement du véhicule, plusieurs méthodes basées sur le principe d'observateurs à modes glissants ont été développées. Nous avons validé les résultats d'estimation en les comparant aux mesures effectuées par l'analyseur de profil en long (APL).

## 1.2 Activités actuelles

Partant de mes connaissances acquises pendant mon DEA et ma thèse, dans les domaines de la modélisation des systèmes mécaniques, de la dynamique du véhicule ainsi que de l'évaluation de son comportement en interaction avec la chaussée, par l'utilisation de techniques issues de l'automatique et de la robotique, j'ai orienté mes activités de recherche vers d'autres applications, à savoir, la dynamique des poids lourds (PL) et leurs impacts sur la sécurité routière.

En effet, ce type de véhicules qui est plus long, plus lourd, plus complexe et donc plus difficile à contrôler a un impact considérable sur la sécurité routière et sur les dommages infligés à l'infrastructure.

Ensuite, et plus récemment, je me suis intéressé au comportement et à l'étude d'un autre type de véhicule, à savoir les deux roues motorisés (2RM).

Les connaissances acquises pendant toutes ces années, les méthodes et les outils utilisés et développés ainsi que les applications réalisées sont résumés sur la figure 1.1.

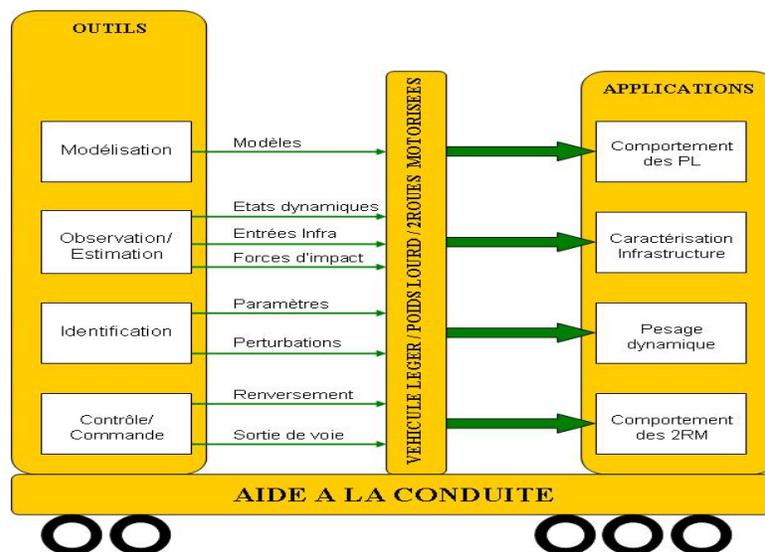


Figure 1.1: Recherche appliquée aux VL, aux PL et aux deux roues motorisées

La démarche que nous avons adoptée est alors la suivante:

- développement de modèles dynamiques du VL, du PL et du 2RM,
- observation et reconstruction des états dynamiques non mesurés et estimation des entrées issues de l'infrastructure, comme l'uni de chaussée, l'adhérence et les forces d'impact,
- identification des paramètres dynamiques du véhicule ainsi que les perturbations éventuelles,
- contrôle et commande du véhicule afin d'aider le conducteur à éviter l'accident comme le renversement et/ou la sortie de voie.

Les méthodes et les outils ainsi développés sont par la suite appliqués pour:

- l'étude du comportement dynamique du véhicule (PL et 2RM) et l'adaptation de sa conduite,
- l'estimation des caractéristiques de l'infrastructure,
- le pesage dynamique et embarqué des PL.

Nous constatons donc que notre travail de recherche actuelle peut être divisé en 3 grandes thématiques:

1. Etude et maîtrise des risques de perte de contrôle des poids lourds pour la sécurité routière
2. Pesage dynamique et embarqué des PL
3. Etude du comportement des deux roues motorisés

Ces thèmes de recherche que nous allons approfondir plus en détails dans la prochaine partie de ce mémoire, sont développés autour d'un axe principal, qui est celui de l'aide à la conduite des poids lourds et des deux roues motorisés.

---

## Chapitre 2

# Activité d'encadrement

---

Depuis ma prise de poste, j'ai encadré 3 post-doctorants, 5 thésards, dont un a soutenu en 2008, un autre en 2010 et trois qui sont en cours ainsi que 5 stagiaires de master 2.

Ces activités d'encadrement sont présentées dans ce chapitre.

### 2.1 Encadrement de Post-Doctorants

- Janvier 2007- Janvier 2008

**Post-doctorant** : Salim Srairi

**Sujet** : Instrumentation d'un PL et programmation en temps réel

**Financement** : Contrat CDD, projet VIF2

**Résumé** : Afin d'améliorer la sécurité routière, le laboratoire est impliqué dans divers travaux de recherche visant à chercher des méthodes permettant de réduire les risques d'accidents, en particulier vis-à-vis du trafic lourd. Dans le cadre du projet VIF (Véhicule Interactif du Futur), le concept d'un système embarqué permettant de prévenir les renversements de poids lourds en virage a été mis au point. Il est prédictif et permet d'alerter le chauffeur qu'un risque important de renversement existe. Il le conseille sur une vitesse maximale à respecter afin de minimiser ce risque. Le poste est orienté vers l'instrumentation d'un poids lourds réel, la programmation d'un logiciel temps réel capable de gérer les capteurs installés sur le poids lourds et capable de générer une alerte en cas de risque accru de renversement.

La première phase de la mission s'est déroulée au laboratoire et a consisté à choisir les capteurs à installer sur un essieu de poids lourds. Le cahier des charges des capteurs a donc été rédigé. Ensuite, ces capteurs sont reliés à un système de recueil de signaux de type dSpace. Le système de recueil de données est ensuite relié à un ordinateur où sont implémentés:

- le logiciel d'estimation développé sous le logiciel Matlab-Simulink
- le système de génération d'alerte à destination du chauffeur

Les essais réalisés au laboratoire ont permis de mettre au point le logiciel temps-réel.

La seconde phase de la mission est l'instrumentation du poids lourds. Les capteurs sont câblés avec le système de recueil de données en tenant compte des informations qui transitent dans le bus CAN du poids lourds. L'alerte est par la suite affichée dans le moniteur à côté du chauffeur et destinée à recevoir tous les autres types d'alarme conçues dans le projet par les autres partenaires. Des essais réels de validation sont réalisés chez Renault Trucks sur la piste de la Valbonne avec un tracteur instrumenté.

**Position actuelle :** Ingénieur des travaux publics de l'État (ITPE), Ministère de l'Ecologie.

**Publications:** 7 publications déjà parues ([ISM08a], [ISM08b], [ISGR08], [IMS08], [IDV+08], [IRR+08], [IBMS09]) et 1 revue en cours de révision [IBMS11].

- Février 2007-Janvier 2008

**Post-doctorant :** Nacim Mefti

**Sujet :** Trafic poids lourd et effet sur l'infrastructure

**Financement :** Contrat CDD, projet européen Heavyroute

**Résumé :** Le projet Heavyroute vise à proposer et à développer des outils de gestion et d'aides à la conduite des poids lourds pour améliorer la sécurité routière, l'économie des transports et la préservation des infrastructures routières. A partir de données statiques issues de bases de données des infrastructures (profils et caractéristiques des chaussées, données sur les ponts et les tunnels), et de données dynamiques sur les poids lourds (poids et dimensions, caractéristiques dynamiques, de suspension, etc.) et sur l'environnement (météo notamment), il s'agit de prévoir et d'estimer les interactions et les impacts sur les infrastructures de poids lourds isolés ou en pelotons. Des outils de localisation et de communication embarqués et de signalisation variable, ont permis d'agir sur le comportement (concept de « guidance ») des chauffeurs et gestionnaires de poids lourds. La première partie de la mission est consacrée à la réalisation d'une étude bibliographique sur les différents types de ponts et les sollicitations qu'ils subissent. Ensuite, des simulations de trafic sont réalisées en utilisant la méthode de Monte-Carlo. Des variations sur les poids, les vitesses des véhicules ainsi que les interdistance sont alors considérées. Ce travail a permis de réaliser une première version du logiciel de gestion de trafic EvolvTraffic, en collaboration avec l'Université de Dublin (UCD).

**Publications:** ([MSSG08], [DMW+09]).

- Février 2008 – Janvier 2009

**Post-doctorant** : Manel Hannachi

**Sujet** : Calcul des effets de trafic sur les ouvrages d'art et les chaussées

**Financement** : Contrat CDD, projet européen Heavyroute

**Résumé** : Dans le cadre du projet de recherche européen HeavyRoute, il était prévu d'estimer les interactions et impacts de poids lourds ou séquences de poids lourds sur les infrastructures (ponts et chaussées), et d'agir, à l'aide d'outils de localisation et de communication embarqués et de signalisation variable, sur la conduite ou la « guidance » de ces poids lourds pour réduire les impacts négatifs sur la sécurité, les infrastructures et l'environnement. Le travail du post-doctorant consistait à utiliser des scénarios de trafic et de calculer leurs effets sur les ouvrages d'art et les chaussées. La première phase de la mission a été consacrée à l'utilisation du logiciel CASTOR permettant de calculer les effets du trafic lourd sur les chaussées et les ponts. Ainsi, en fonction des stratégies de gestion du trafic (augmentation des interdistances entre poids lourds, diminution de la vitesse maximale autorisée), l'effet correspondant (fatigue ou charge extrême) est calculé. A partir de ces effets, des stratégies de gestion de trafic sont mises en place pour minimiser les risques encourus (fatigue ou charge extrême). Dans une seconde phase, des données réelles de trafic mesurées par les stations de pesage en marche SIREDO, sont utilisées pour prévoir les effets en situation terrain. Ces données ont permis également de valider le logiciel de simulation de trafic Evolvetraffic. Pendant la dernière phase, la préparation et l'assistance à la partie expérimentale du projet HeavyRoute ont été effectuées pour valider les outils développés (installation des systèmes de pesage à l'abord ou en amont d'ouvrages sensibles (ponts de grandes portées, à capacité portante réduite, etc.).

**Position actuelle** : Maître de conférences, Université de Tizi-Ouzou, Algérie.

**Publications**: ([UIS<sup>+</sup>08], [IHO<sup>+</sup>08], [FEI<sup>+</sup>08], [ISIH08], [IHCO08], [ISI<sup>+</sup>09]).

## 2.2 Encadrement de doctorants

- Novembre 2009 – décembre 2012

**Doctorant** : Amine Khettat

**Encadrement** : H. Imine (40%), S. Bouaziz (30%), S. Espié (20%), H. Arioui (10%)

**Sujet** : Automatisation du pilotage d'un deux-roues motorisé: modélisation dynamique et contrôle.

**Financement** : Allocation de recherche LCPC

**École doctorale :** STITS (Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes), Numéro 422, UPSUd Orsay.

**Résumé :** Les travaux proposés dans le cadre de cette thèse sont relatifs à la mise au point d'un modèle de dynamique moto et d'un algorithme de contrôle de la trajectoire d'une moto et à leur validation par le biais d'une confrontation entre les résultats simulés et les résultats issus des expérimentations réalisées sur piste avec la moto automatisée. On s'appuiera sur le prototype de moto « automatisée » et sur les dispositifs de mesure et d'enregistrement de la dynamique moto disponibles dans l'unité de recherche pour mener les expérimentations sur piste.

Les travaux de recherche conduits dans le cadre de cette thèse portent sur :

- une analyse bibliographique sur les modèles de dynamique moto et sur les méthodes de contrôle/commande,
- le développement d'un modèle de dynamique moto,
- le développement d'un algorithme de contrôle/commande,
- l'intégration du système de contrôle/commande dans l'architecture embarquée existante,
- la réalisation de tests de validation sur piste.

A terme, les travaux menés durant cette thèse permettront de tester les systèmes de sécurité actifs en autorisant des séquences reproductibles sur piste ou sur simulateur.

**Publications:** 2 publications déjà parues ([NKA<sup>+</sup>10], [KBIE11a]) et une autre soumise [KBIE11b].

- Novembre 2009 – décembre 2012

**Doctorant :** Hamadi Nacer

**Encadrement :** H. Imine (50%), D. Ameddah (50%)

**Sujet :** Développement d'un système de contrôle latéral/longitudinal d'un véhicule

**Financement :** Bourse algérienne, Université de Batna.

**Résumé :** Le but de cette thèse est de développer un système de contrôle longitudinal et latéral d'un véhicule. Au préalable un modèle complet de la dynamique du véhicule doit être développé et validé. Ensuite des méthodes de contrôle robustes vont être mises en œuvre. La validation des algorithmes de contrôle développés sera effectuée grâce à la comparaison des résultats de simulation à ceux issus d'expérimentation réalisées avec un véhicule instrumenté. Un modèle complet de véhicule est déjà réalisé et testé par simulations et par l'utilisation de résultats issus d'expérimentation réalisées dans le cadre de la thèse de H. Imine [Imi03]. Des méthodes de contrôle commande robustes basées sur

les modes glissants sont en cours de développement. Ces dernières seront comparées à d'autres méthodes de contrôle comme le PID.

**Publications:** Un papier soumis [HIA12].

- Décembre 2011 – décembre 2015

**Doctorant :** Saad Babesse

**Encadrement :** H. Imine (50%), D. Ameddah (50%)

**Sujet :** Commande d'un poids lourd sous l'effet de l'interaction roue/sol

**Financement :** Bourse algérienne, Université de Batna.

**Résumé :** Le but de cette thèse est de développer un système de contrôle d'un poids lourd en interaction avec l'infrastructure. Dans un premier temps, un modèle approprié de la dynamique du PL est étudié puis développé et validé. Des observateurs/estimateurs seront également développés afin d'estimer les variables non mesurées du système. Ensuite des méthodes de contrôle robustes vont être mises en œuvre afin de contrôler la trajectoire du véhicule et éviter les risques d'accidents tels que le renversement et la sortie de route. La validation des algorithmes sera effectuée grâce à la comparaison des résultats de simulation à ceux issus d'expérimentation réalisées avec un véhicule instrumenté, notamment à ceux provenant des projets VIF et Heavyroute.

- Octobre 2007 – décembre 2010

**Doctorant :** Omar Khemoudj

**Encadrement :** H. Imine (50%), M. Djemai (50%)

**Sujet :** Développement d'un système de pesage embarqué de Poids lourd par l'estimation des forces d'impact.

**Financement :** Allocation de recherche LCPC

**École doctorale:** Sciences pour l'ingénieur (Lille), Université de Valenciennes et du Hainault-Cambrésis

**Résumé :** La méthode proposée dans ce travail de thèse est basée sur l'utilisation des techniques de l'automatique en vue de reconstituer en temps réel les forces d'impact dynamiques du poids lourd à partir de mesures de capteurs embarqués dans le véhicule. Après avoir développé différents types de modèles dynamiques de PL, qui sont validés sur le logiciel de simulation PROSPER dont dispose le laboratoire, nous avons mis au point plusieurs méthodes afin d'estimer les forces d'impact dynamiques. L'une d'entre elles a été validée sur le logiciel PROSPER ainsi que sur un banc d'essai en collaboration avec ARRB

(laboratoire de recherche australien). Une méthode d'alerte et de contrôle actif basée sur les forces d'impact estimées (indicateurs de la stabilité de véhicule) est également proposée. Elle permet de contrôler l'impact de ces forces sur l'infrastructure et ainsi diminuer leurs effets.

**Date de soutenance** : 02 décembre 2010 avec la mention très honorable

**Position actuelle** : CDI- Ing. R&D Groupe ALTRAN

**Publications**: 8 publications ([KID09], [KID10a], [KID10d], [KID10b], [KIDF10], [KID10c], [IK11], [IDKG12]), deux revues déjà publiées ([KID10e], [KID11]) et une autre en cours de révision [KIDB11].

- Octobre 2005 – Novembre 2008

**Doctorant** : Yamine Sellami

**Encadrement** : H. Imine (50%), J.C. Cadiou (50%)

**Sujet** : Approche fiabiliste et mécanique du comportement des poids lourds et de leur sécurité

**Financement** : Allocation de recherche LCPC

**École doctorale**: STIM, Université de Nantes

**Résumé** : L'objet de cette thèse était l'utilisation de la théorie de fiabilité pour l'évaluation et la prévention des risques de poids lourds. Cette évaluation est basée sur les informations statistiques relatives au système conducteur/poids lourd/infrastructure. La démarche a consisté à modéliser les paramètres les plus influents du modèle déterministe par des variables aléatoires. Sur l'intervalle de prédiction, le risque de renversement est évalué par le maximum du rapport de transfert de charge (LTR) entre les côtés gauche et droit du véhicule. Une étude de sensibilité est réalisée afin d'extraire les paramètres les plus influents sur le risque de renversement. Afin d'optimiser le temps de calcul, nous avons développé un modèle empirique du risque de renversement à partir de tests réalisés sur un modèle plus complet du véhicule et plus représentatif du risque. Le modèle empirique fournit, soit une fonction explicite de l'état limite en fonction des paramètres influents sur le risque, soit une expression de l'indice de fiabilité en fonction des paramètres des lois de distribution des variables aléatoires. Dans les deux cas, les paramètres déterministes susceptibles de varier entre deux situations de conduites sont considérés comme entrées du modèle. Pour chacun des cas étudiés, les résultats obtenus sont comparés et validés avec des simulations de Monte Carlo et des tirages d'importance.

**Date de soutenance** : 14 novembre 2008 avec la mention très honorable

**Position actuelle** : Enseignant, école d'ingénieur.

**Publications:** 6 publications ([DISB07], [SIO8], [IDS08], [SICH08], [SIB+08b], [SIB+08a]).

## 2.3 Encadrement de Master 2

- Février 2009– Septembre 2010

**Etudiant :** Chaban Sider

**Intitulé du Master :** Réalité Virtuelle et Systèmes Intelligents (RVSI), UEVE.

**Sujet :** Technique de pesage de poids lourds en marche avec prise en compte des effets dynamiques.

**Financement :** Contrat LCPC

**Résumé :** Dans ce stage que j'ai encadré avec S. Seng du LEPSIS, les résultats d'un système de pesage embarqué basé sur l'estimation des forces d'impact dynamique sont exploités. Un PL instrumenté est utilisé sur la chaussée d'un site de pesage.

Les tâches réalisées par le stagiaire sont:

- analyse en parallèle des signaux du système embarqué et des capteurs au sol,
- construction de la distribution de la force dynamique, considérée comme une variable aléatoire,
- développement et implantation en Matlab et en C/C++ de l'algorithme permettant de traiter automatiquement les deux premières tâches demandées.

- Février 2009– Septembre 2009

**Etudiant :** Karim Belharet

**Intitulé du Master :** Réalité Virtuelle et Systèmes Intelligents (RVSI), UEVE.

**Sujet :** Modélisation Bond de Graph d'un véhicule deux roues et validation

**Financement :** Contrat LCPC

**Résumé :** Le travail du stage assuré par K. Belharet a été encadré conjointement avec H. Arioui de IBISC et R. Merzouki du LAGIS. Il a consisté à recenser, dans un premier temps, les différents types de modèles deux roues qui existent en littérature et la compréhension des comportements dynamique de ce type de véhicules. En fonction de la complexité et de la nature de ces modèles, la deuxième phase du stage a concerné le développement des outils Bond Graph nécessaires à la modélisation d'un véhicule deux roues. Les techniques de modélisation basées sur les Bond de Graph semblent être les plus adéquates à cette problématique du fait de leur capacité à décrire le comportement d'un

système quelconque ayant différentes sources d'énergie (électrique, mécanique, pneumatique, etc.). A la fin du stage un modèle dynamique englobant les composantes longitudinales, latérales et roulis a été développé. La phase de validation de ce modèle n'a pas été effectuée pour cause d'indisponibilité de la moto instrumentée à cette période.

- Février 2007– Juillet 2007

**Etudiant** : Toufik Ayache

**Intitulé du Master** : Mathématiques Appliquées, Université Paris Descartes

**Sujet** : Etude probabiliste du comportement du Poids Lourd

**Financement** : Contrat LCPC

**Résumé** : Ce stage a présenté une étude probabiliste du comportement de poids lourd, en étudiant d'abord le modèle simple et linéaire d'Ackermann. Le risque de renversement est caractérisé par un indicateur qui est fortement sensible à certains paramètres du poids lourd. Ces paramètres ne sont pas connus avec certitudes et les rendre aléatoires est nécessaire afin de construire un modèle plus réaliste, d'où la construction du modèle probabiliste. Les simulations de Monte Carlo ont permis d'avoir des données statistiques considérées réelles afin d'estimer les lois de probabilités des variables d'état, la dérivée de l'état et le coefficient de renversement LTR par les méthodes d'estimations non paramétrique. Une étude des résidus du modèle a été réalisée afin de prendre en compte les erreurs de la modélisation et les perturbations qui existent au niveau des accélérations, l'angle de braquage et l'effet dû aux infrastructures.

- Février 2006– Juillet 2006

**Etudiant** : Jamil Dakhlallah

**Intitulé du Master** : Robotique - Productique, ENSAM, Université Paris 6

**Sujet** : Etude comparative pour l'estimation des états dynamiques d'un PL et l'évaluation du risque de renversement

**Financement** : Contrat LCPC

**Résumé** : L'objectif de ce stage co-encadré avec D. Bellot de l'Université de Paris 6, était de proposer une méthode permettant d'estimer le risque de renversement d'un poids lourd. L'évaluation de ce risque suppose la connaissance de l'état dynamique du poids lourd. Nous avons donc été amené à répondre aux questions suivantes :

- quel type d'estimateur est le plus approprié pour reconstituer l'état dynamique d'un PL ?

- quelle est la probabilité d'avoir un risque de renversement du PL ?

Après un bref état de l'art concernant les modèles mathématiques de poids lourds, les indicateurs de risque de renversement ainsi que quelques méthodes d'estimation, une modélisation du poids lourd est développée. Un modèle simple mais aussi suffisant pour permettre l'évaluation du risque de renversement est donc choisi. Ensuite, une étude détaillée du modèle d'Ackermann est présentée et une simulation de ce modèle est faite en évaluant le risque de renversement par le calcul de son indicateur. L'estimation de l'état dynamique du poids lourd a été réalisée par deux types d'estimateurs différents : le filtre de Kalman et ses variantes (Kalman Etendu et Kalman Unscented) et l'observateur à modes glissants. Des résultats de simulation sont donnés pour comparer les deux méthodes d'estimation.

**Publications:** 2 publications ([DISB07], [IDS08]).

- Février 2006– Juillet 2006

**Etudiant :** Sylvain Arreckx

**Intitulé du Master :** Automatique, génie informatique et image, Université des sciences et technologies de Lille (USTL)

**Sujet :** Etude de l'Influence des paramètres du véhicule sur le renversement des poids lourds et étude de sensibilité capteurs.

**Financement :** Contrat LCPC

**Résumé :** Durant ce stage, que j'ai co-encadré avec R. Merzouki du LAGIS, une étude de sensibilité paramétrique d'un modèle de poids lourd a été réalisée afin d'étudier l'influence de chaque paramètre sur la dynamique du PL. Dans le cadre du projet VIF, un système de renversement PL a été développé tenant compte de l'infrastructure (rayon de courbure, devers, uni, adhérence, pente). Avant de passer à la deuxième phase de ce projet qui est la partie instrumentation et validation, le stagiaire a réalisé une étude de capteurs (type de capteurs, coût et sensibilité de chaque capteur) et a étudié leur influence sur l'estimation et l'alerte au renversement. A cet effet, une étude d'observabilité du système a également été faite. La seconde partie de ce stage a été consacrée à l'étude de faisabilité temps réel d'estimation des forces verticales.



---

## Chapitre 3

# Activité d'enseignement

---

Mes activités d'enseignement qui sont résumées dans le tableau de la figure 3.2 ont commencé dès 2000, l'année à laquelle j'ai débuté ma thèse. L'enseignement me permet de garder un lien entre le laboratoire et le monde universitaire pour une meilleure diffusion des connaissances. Les activités de recherche n'auraient pu se faire sans les étudiants avec qui j'ai eu le plaisir de travailler, en thèses ou en master recherche.

	Modules	Nombre d'heures D'enseignement	Classes	Volume horaire annuel
2008 - 2009	Automatique et dynamique véhicule	20h Cours	Magister, Université de Batna, Algérie	20h
2007 - 2008	Électronique et traitement de signal	15h TP	2 <sup>ème</sup> année GTR, IUT de Vélizy	15h
	Filtrage adaptatif	10h TD et 16h TP	Master 2 Paris 6	26h
2003 - 2004	<u>Télécommunications</u> Théorie et traitement du signal; Transmission à bande de base;  <u>Amplificateur Opérationnel</u> Amplificateurs de tension; Amplificateur opérationnel; Filtres actifs.	96 h TD	2 <sup>ème</sup> année GTR, IUT de Vélizy	96 h
2001 - 2002	<u>Architecture des Microprocesseurs</u> Systèmes à base de microprocesseurs; Principes de la programmation en temps réel; Processeur Pipeline: Conception et simulation.	15 h TD	2 <sup>ème</sup> année Ing. ENSTA	87 h
	<u>Télécommunications</u> Théorie et traitement du signal; Transmission à bande de base;	72 h TD	2 <sup>ème</sup> année GTR IUT de Vélizy	
2000 - 2001	<u>Automatique</u> Systèmes asservis; Identification; Synthèse de correcteurs analogiques et numériques.	48 h TD	2 <sup>ème</sup> année GEII, IUP d'Evry	48 h

Figure 3.2: Tableau récapitulatif des enseignements assurés

Entre 2000 et 2001, j'ai exercé la fonction de chargé de TD à l'IUP d'Evry, dans le domaine de l'automatique (système asservis, identification..) avec un volume horaire de 48h. L'année universitaire suivante (2001-2002), j'ai été en charge de 72h de TD à l'IUT de Vélizy dans le domaine des télécommunications (transmission, traitement du signal...). J'ai eu également en charge pendant cette même année, 15h de TD dans le domaine de l'architecture des microprocesseurs (systèmes à microprocesseurs, programmation temps réel...) à l'ENSTA. Entre 2003 et 2004, j'ai été ATER à temps partiel avec un volume horaire de 96h de TD, au département Génie des Télécommunications et Réseaux (GTR) de l'IUT de Vélizy. Entre 2005 et 2006, j'ai volontairement décidé de ne pas enseigner pour me consacrer à mon poste de chercheur que je viens d'avoir au LCPC afin de bien réussir mon intégration. En 2007, j'ai repris les enseignements à l'Université de Paris 6 avec 10h de TD et 16h de TP consacrés essentiellement au filtrage adaptatif et au traitement du signal. A la même période, 2007-2008, j'ai été en charge de 15h de TP d'électronique et de traitement du signal à l'IUT de Vélizy. En 2008, j'ai été contacté par l'Université de Batna, en Algérie pour donner l'équivalent de 20h de cours (séminaires) en automatique appliquée à la dynamique du véhicule.

## 3.1 Télécommunication

Deux parties constituent ce module:

### 3.1.1 Théorie et traitement du signal

Les travaux pratiques sont réalisés sous le logiciel Matlab afin de mieux comprendre les principaux outils de traitement du signal utilisés en électronique. La caractérisation des systèmes linéaires est présentée. Les étudiants vérifient l'analyse spectrale et la numérisation ainsi que les phénomènes de bruit de quantification. Les différentes transformations qui s'appliquent aux signaux numériques sont présentées et en particulier la Transformée de Fourier dans le cas des signaux analogiques et la transformée de Fourier Discrète dans le cas des signaux numériques, ainsi que leur réalisation rapide. Le filtrage numérique est aussi exposé.

### 3.1.2 Transmission à bande de base et caractérisation du canal de transmission

Dans la partie de transmission à bande de base, les travaux pratiques sont consacrés à l'étude des différents codages en bande de base utilisés pour préparer le signal à transmettre

via le canal de transmission. Les travaux pratiques s'appuient sur la modélisation des canaux de transmission, caractérisation de ce dernier en termes de capacité, de débit, de largeur de bande, de vitesse de transmission et de vitesse de propagation. Les travaux sont réalisés sur des maquettes modélisant un émetteur et un récepteur pour l'étude des caractéristiques d'un câble coaxial et des paires torsadées. Une transmission sur une fibre optique utilisant un wattmètre et un reflectomètre ainsi qu'une transmission par modem et téléphonie sont également étudiées et testées.

Mots clés: Systèmes linéaires, échantillonnage, quantification, filtrage numérique, transformée de Fourier, lissage, canal de transmission, débit, bande passante.

Moyens utilisés: le logiciel de calcul « Matlab ».

## 3.2 Architecture des Microprocesseurs

Ce cours est une introduction à l'architecture des microprocesseurs. Les mécanismes de base de fonctionnement ainsi que les méthodologies de conception architecturales sont introduits.

Partant de l'analyse de programmes de référence (benchmarks) et leurs besoins en calcul, nous synthétisons ces besoins et dérivons les supports matériels pour leurs exécutions. En particulier, la définition du jeu d'instruction des microprocesseurs, le mode d'exécution des instructions, les mécanismes d'accès à la mémoire et les mécanismes d'interaction avec les périphériques sont présentés. Le cours s'appuie sur de nombreux exemples basés sur des processeurs commerciaux comme le Pentium 4, l'UltraSparc III et l'ARM. Enfin le cours avait pour objectif de montrer comment ces mécanismes architecturaux interagissent avec les applications logicielles et le système d'exploitation et comment ils peuvent influencer les méthodes de programmation. Les travaux pratiques portaient essentiellement sur la conception d'un Processeur pipeline. Toutes les étapes qui précèdent cette réalisation telles que: méthodologie de conception, jeux d'instruction, apprentissage du Logiciel de CAO Xilinx sont effectués au cours des différents travaux pratiques.

Mots clés: CAO, électronique, micro architecture, microprocesseurs, numérique.

Moyens logiciels utilisés: Logiciel de CAO Xilinx Foundation, émulateur VmWare (Windows NT/Linux), simulateur de Microprocesseur SimpleScalar.

## 3.3 Automatique

L'objectif principal de ces travaux pratiques, est de former les étudiants aux notions de base d'analyse des systèmes ainsi que les représentations temporelles et fréquentielles des

systèmes élémentaires du premier et du second ordre. Ils servent également à leur apprendre à maîtriser les tracés fréquentiels et plus particulièrement Bode et à déterminer les paramètres de la fonction de transfert d'un système par la méthode indicelle. Durant ces travaux pratiques, on a défini les propriétés d'un système dynamique ainsi que ses performances et on a étudié les systèmes asservis et la stabilité. Afin de mettre en pratique toutes les connaissances théoriques, des travaux pratiques sous Matlab sont organisés et appliqués à un moteur à courant continu.

Mots clés: Modélisation, systèmes asservis, performances des systèmes bouclés, analyse temporelle, analyse fréquentielle.

Moyens logiciels utilisés: Matlab Simulink.

### **3.4 Dynamique du véhicule**

Ce cours est consacré à la description du véhicule et de son comportement. Des notions de base sur la modélisation dynamique du véhicule sont expliquées. Chaque partie du modèle dynamique est développée, allant du pneumatique, de la suspension et de la masse suspendue qui constitue le châssis. Afin de mieux montrer le comportement du modèle, des résultats de simulation ainsi que des résultats issus d'expérimentations avec un véhicule instrumenté sont montrés et commentés. Nous avons également expliqué dans ce cours le modèle dynamique du PL et nous avons montré les différences qui existent entre ce type de véhicule et la voiture. Durant ce cours, les résultats issus d'expérimentations effectuées dans le cadre de différents projets de recherche tels que VIF et Heavyroute, sont présentés.

---

## Chapitre 4

# Administration de la recherche

---

Dans ce chapitre, les différentes responsabilités administratives et les projets dans lesquels je suis intervenu, sont montrés. Mes activités éditoriales ainsi que les groupes de recherche auxquels je prend part sont également donnés.

### 4.1 Responsabilités administratives

- 2005- à ce jour : Responsable de l'axe de recherche « Poids lourds ». Au-delà de l'animation de la recherche au sein du laboratoire, mon rôle consiste à proposer des projets en relation avec la dynamique du PL et son impact sur l'infrastructure et sur l'environnement.
- 2007- à ce jour : Responsable du programme de recherche PLINFRA: Chaque année et en tant que responsable, j'ai le rôle de récolter et d'examiner les propositions de recherche de chaque équipe et laboratoire de recherche, d'allouer les budgets équivalents et bien évidemment de veiller à ce que chaque équipe respecte les objectifs qui sont les siennes dans PLINFRA.
- 2009- à ce jour : Responsable de suivi du projet de collaboration CalFrance.
- 2007-2010 : Responsable administrative du projet VIF : Suivi et gestion des dépenses budgétaires relatives aux travaux du LCPC ainsi qu'aux équipes et laboratoires associés. Je suis également responsable des contrats et sous-traitances en lien avec le projet (Université de Versailles, CERAM, Renault Trucks).
- 2007-2009 : Responsable administrative du projet HEAVYROUTE : Suivi et gestion des dépenses budgétaires relatives aux travaux du LCPC ainsi qu'aux équipes et laboratoires associés. Je suis également responsable des contrats et sous-traitances en lien avec le projet (Université de l'UCD, Dublin, Irlande).

## 4.2 Responsabilités de projets

Tous les travaux de recherche sont réalisés dans le cadre de projets de recherche financés, soit en interne dans le cadre d'opérations de recherche (TRUCKS, PLINFRA), soit par l'ANR, PREDIT soutenus par les pôles de compétitivités, ou encore par la commission européenne dans le cadre du programme PCRD.

- 2012-2014: Projet RAVBIT: "Risk Analysis of heavy Vehicles using Bifurcations Theory", projet européen que j'ai soumis avec N. Khraief, maître de conférence à l'Université de Tunis, au 7ème PCRD, actions Marie-curie. Ce projet une fois accepté, permettra d'enrichir la collaboration entre nos deux institutions dans les domaines du transport, de la dynamique du véhicule, d'analyse et de prédiction des risques d'accidents.
- 2012-2015: Projet DIAVOS: "DIAGnostic de comportement dynamique des Véhicules en vue d'Optimisation de la Sécurité routière", contribution au montage de ce projet soumis pour un financement du ministère algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Ce projet a pour objectif de développer un dispositif permettant de prévoir et de compenser une défaillance d'un élément du système véhicule-infrastructure-conducteur. C'est un projet, si il est accepté, qui permettra de développer la thématique de la sécurité routière et de la dynamique véhicule, du point de vue théorique et expérimental. En effet, il est prévu dans ce projet de réaliser un véhicule instrumenté et un banc d'essais afin de valider les études théoriques par des expérimentations. Ce projet sera d'un grand apport pour les étudiants de l'Université de Batna. Il permettra également de renforcer la collaboration entre le LEPSIS et l'Université algérienne.

Budget :  $\sim 36.40k\text{€}$ .

- 2012-2015: Projet HPWIM, "High Precision Weigh-In-Motion": contribution au montage de ce projet FUI qui est soumis en novembre 2011. Ce projet s'inscrit dans le DAS (Domaine d'Activité Stratégique) « Sécurité Routière » du pôle de compétitivité MOV'EO qui a pour mission de réduire l'insécurité routière pour tous types d'utilisateurs sur la route et dont le premier axe de recherche est de développer des solutions technologiques pour les infrastructures. J'ai contribué au montage de ce projet FUI (Fonds Unique Interministériel) qui est soumis en Avril 2011.

Du point de vue technique, j'interviens pour développer une méthode de pesage embarqué des PL et par la même, améliorer la précision du système déjà existant.

L'entreprise STERELA<sup>1</sup>, qui est le porteur de ce projet, est une entreprise française leader en réalisation de systèmes électroniques pour les Transports.

Budget : 400k€. Les partenaires sont:

- STERELA, coordinateur
- SURVISION
- MULTITOLL
- IFSTTAR
- Institut Mathématique de Toulouse (Université Paul Sabatier), IMT
- CETE de l'Est : Centre d'Études Techniques de l'Équipement
- LAAS, CNRS

- 2009-2012 : Projet CalFrance: J'ai participé activement au montage de ce projet Franco-Californien en collaboration avec S. Shladover de l'Université de Californie, USA. Il porte sur l'étude du convoi (platoonig) des véhicules lourds en Europe et aux USA.

Budget : 16k€.

- 2007-2011 : Co-responsable et animateur de l'opération de recherche (OR) PLIN-FRA, qui est la suite de l'OR TRUCKS.

Budget : ~ 300k€/an.

- 2009-2010 : Contribution au montage et à l'étude du projet européen OCDE DG/MOVE sur les nouveaux poids lourds les plus longs et les plus lourds (EMS).

Contribution à l'état de l'art ainsi qu'à l'étude sur les solutions à apporter pour diminuer les risques d'accidents ainsi que les effets de ce type de poids lourds sur l'infrastructure.

Budget : 260 k€. Les partenaires sont :

- Transport & Mobility Leuven, TML, Belgique, coordinateur
- Institute for Applied Scientific Research, TNO, Pays-Bas
- IFSTTAR
- Service technique du Ministère de l'Écologie, SETRA, France
- RWTH Aachen University, Allemagne

- 2006-2009 : Projet Heavyroute : projet européen du 6e PCRD, 1/9/2006 - 1/3/2009 : responsable des tâches 2.4 et 2.5 du Work Package WP2 ainsi que des tâches 3.3 et 3.4 du WP3.

Budget: 2075k€. Les partenaires sont :

---

<sup>1</sup><http://www.sterela.fr/>

- Swedish National Road and Transport Research Institute, VTI (Suède), coordinateur

- IFSTTAR ( Ex LCPC)
- VOLVO Technology AB, Suède
- ERTICO (Belgique)
- ARSENAL Research, Autriche
- Planung Transport Verkehr AG, PTV, Allemagne
- NAVTEQ, Pays bas
- Forum of European National Highway Research Laboratories, FEHRL, Belgique

- 2005-2008 : Projet VIF, ‘Véhicule PL Interactif du futur’, financé par la DGMT (MEDAD) pour la phase 1 (2005-2006) et par le FCE dans le cadre du pôle de compétitivité lyonnais, LUTB pour la phase 2 (2007-2008) : responsable local du projet et responsable des tâches 6 et 7.

Budget : 698.44k€ (phase 1)+290k€ (phase 2). Les partenaires sont :

- Renault Trucks, coordinateur
- IFSTTAR (Ex LCPC)
- SODIT
- MICHELIN
- ACTIA

- 2003-2007 : Participation à l’opération de recherche TRUCKS qui a pour objectif d’étudier comment améliorer la sécurité du trafic et des infrastructures vis à vis des risques liés aux poids lourds, et de limiter les impacts du transport routier de marchandises sur les infrastructures et l’environnement. J’ai contribué à la rédaction du rapport final et à l’organisation du séminaire final où j’ai été en charge de présenter les travaux liés au sujet 1, sur la sécurité des PL et des infrastructures.

Budget : ~ 300k€/an.

- 2002-2005 : Participation au Projet ARCOS (Action de Recherche pour une Conduite Sécurisée), projet PREDIT (Programme de Recherche et d’Innovation dans les Transports terrestres) et concerne l’amélioration de la sécurité routière, avec un objectif à terme de réduction des accidents de 30%. Mon implication dans le projet ARCOS consiste à développer puis à intégrer l’algorithme de reconstruction de profil de route estimé par observateurs à modes glissants dans l’application "ARCOS Adhérence" pour l’implémenter dans le logiciel CALLAS-PROSPER de CERA-CD.

### 4.2.1 Projet VIF

Le projet VIF (Véhicule Interactif du Futur) financé par la DGMT (MEDAD) pour la phase 1 (2005-2006) et par le FCE dans le cadre du pôle de compétitivité lyonnais « LUTB » pour la phase 2 (2007-2008) a pour objet d'augmenter la sécurité des poids lourds et celle des autres usagers, de réduire les dommages infligés aux infrastructures (chaussées et ponts) et d'augmenter la productivité du transport routier (par ex. diminution du temps de parcours) en accroissant l'interactivité entre les poids lourds, l'infrastructure et les conducteurs. Les télécommunications jouent un rôle majeur dans les échanges de données entre les poids lourds (PL), l'infrastructure (I) et les conducteurs (C). Le partage de ces informations entre les différents acteurs, permet d'optimiser l'interactivité entre les 3 acteurs PL/I/C afin d'atteindre les objectifs du projet.

Le projet est divisé en 2 phases : la première phase (année 2005-2006) est destinée à réaliser la définition fonctionnelle et la validation du projet.

La seconde partie du projet (2006-2007) est consacrée à l'intégration, l'expérimentation et l'évaluation du projet.

Le projet est coordonné par Renault Trucks (aspects véhicule). Les autres partenaires sont le LCPC (aspects infrastructure et estimation du risque), associé au CETE de Lyon et au CETE de l'Est, Michelin (aspects pneumatique), SODIT, la Société pour le Développement de l'Innovation dans les Transports (aspects télécommunication)<sup>2</sup> et ACTIA (aspects chronotachygraphes).

La figure 4.3 illustre l'architecture du système global.

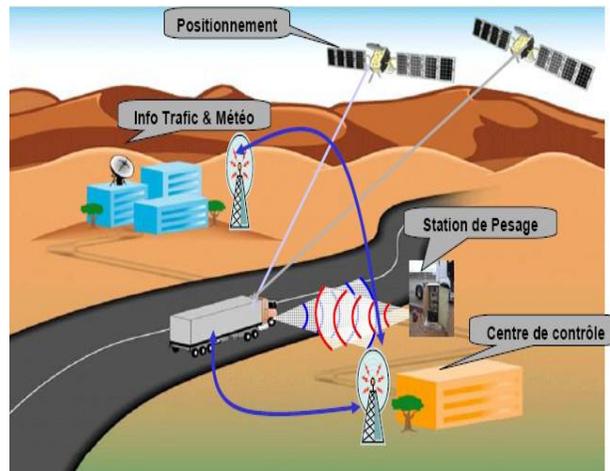


Figure 4.3: Architecture globale du système 'VIF'

<sup>2</sup><http://sodit.free.fr/>

Dès ma prise de poste au LEPSIS, et dans le cadre de la première phase de ce projet, j'ai travaillé sur les effets du trafic lourd sur la sécurité et leur impact sur l'infrastructure (caractérisation des sollicitations induites et effets de l'infrastructure sur les Poids Lourds et la sécurité). J'ai contribué à développer des spécifications fonctionnelles liées à l'infrastructure et ses interactions avec les poids lourds et j'ai réalisé une étude de faisabilité du système. A cet effet, des outils d'automatique, à savoir, les observateurs à modes glissants ont été appliqués, pour la prédiction et l'estimation des états et des forces exercées sur un poids lourd, notamment les forces verticales. Ensuite la mise au point d'un système de prédiction de renversement d'un poids lourd a été réalisée. Des simulations ont été réalisées sous le logiciel de calcul Matlab-Simulink en tenant compte de la base de données infrastructure (rayon de courbure, pente, dévers, uni, adhérence). Les validations ont été faites sous le logiciel de simulation PROSPER.

Les résultats de ces travaux ont été publiés au congrès ISHVWD " 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights And Dimensions" qui s'est tenu à Penn State aux Etats Unis en Juin 2006 et au congrès mondial d'automobile FISITA'06 qui s'est déroulé à Yokohama au Japon, en Octobre 2006.

La deuxième phase de ce projet VIF2, est consacrée à instrumentation du PL et à la réalisation des fonctions dont le LCPC est responsable, qui sont : prédiction de renversement, estimation des forces d'impact et gestion d'accès à l'infrastructure utilisant une station de pesage en marche. Après le départ de V. Dolcemascolo de IFSTTAR, j'ai repris la responsabilité locale du projet, du point de vue administratif et scientifique, et j'ai été en charge de plusieurs tâches. J'ai encadré, à cet effet, 1 post doc et j'avais en charge de suivre les travaux des équipes de recherche associées de Lyon et de Metz (CETE de l'Est et CETE de Lyon).

Du point de vue recherche, une première étape, a été de réaliser une étude sur les capteurs à installer dans le poids lourd en fonction de leurs sensibilités, précisions, emplacements dans le poids lourd et bien sûr de leurs coûts. Ce travail que j'ai réalisé en collaboration avec l'Ecole Polytechnique de Lille et l'Université de Versailles, a permis de rédiger un rapport sur la sensibilité des capteurs et de leur influence sur l'estimation et la prédiction de renversement. Des essais sont ensuite réalisés avec un poids lourd instrumenté sur la piste de la Valbonne de Renault Trucks, qui ont permis de valider les algorithmes de prédiction de renversement et de gestion d'accès. Un séminaire de clôture dont j'avais la responsabilité, a été organisé avec succès, sur le site de Renault Trucks à la Valbonne où plusieurs invités de tout bord, comme des constructeurs, des gestionnaires de l'infrastructure, des gens du réseau scientifique et technique...etc ont participé. Un film

décrivant le projet VIF, que j'ai eu la charge de faire réaliser a été présenté lors de cette manifestation.

#### 4.2.2 Projet Heavyroute

Le projet européen HEAVYROUTE du 6ème PCRD (2006-2009), dont le coordinateur est VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute)<sup>3</sup>, portait sur la gestion du trafic et les aides à la conduite des PL vis à vis de la sécurité routière, de l'économie des transports et de la préservation des infrastructures routières.

Globalement, il s'agit, à partir de données statiques issues d'une base de données d'infrastructure (profils et caractéristiques routières tels que la pente, le rayon de courbure, le dévers, adhérence, données sur les ponts et les tunnels), et de données « dynamiques » sur les poids lourds (poids et dimensions, caractéristiques dynamiques du véhicule et des pneus, etc.), de prévoir et d'estimer les interactions et impacts de poids lourds ou séquences de poids lourds sur les infrastructures, et d'agir ensuite, à l'aide d'outils de localisation et de communication embarqués et de signalisation variable, sur la conduite ou la « guidance » de ces poids lourds afin de réduire les impacts négatifs sur la sécurité, les infrastructures et l'environnement.

La figure 4.4 décrit le schéma en blocs du projet.

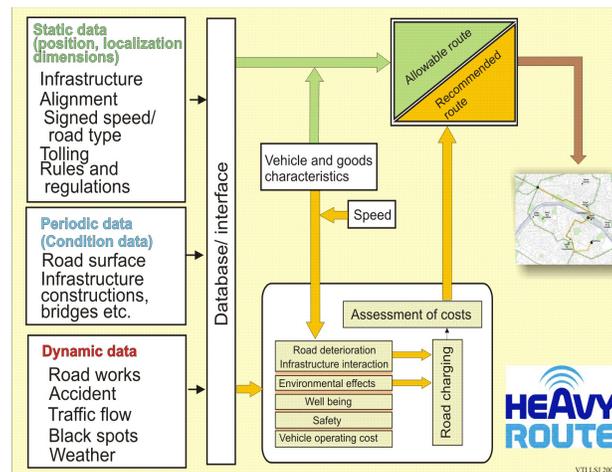


Figure 4.4: Schéma descriptif du projet Heavyroute

Durant ce projet, j'ai été le correspondant du LCPC où j'assurais des responsabilités de plusieurs tâches des différents sujets. Du point de vue recherche, j'ai contribué aux aspects gestion et impact du trafic lourd sur les ouvrages ainsi que sur le développement et la mise

<sup>3</sup><http://www.vti.se/>

au point d'un système de calcul de la vitesse de consigne pour éviter le renversement du PL. Ce système décrit par la figure 4.5, a été validé par des expérimentations effectuées en suède sur un PL instrumenté de VOLVO Trucks.

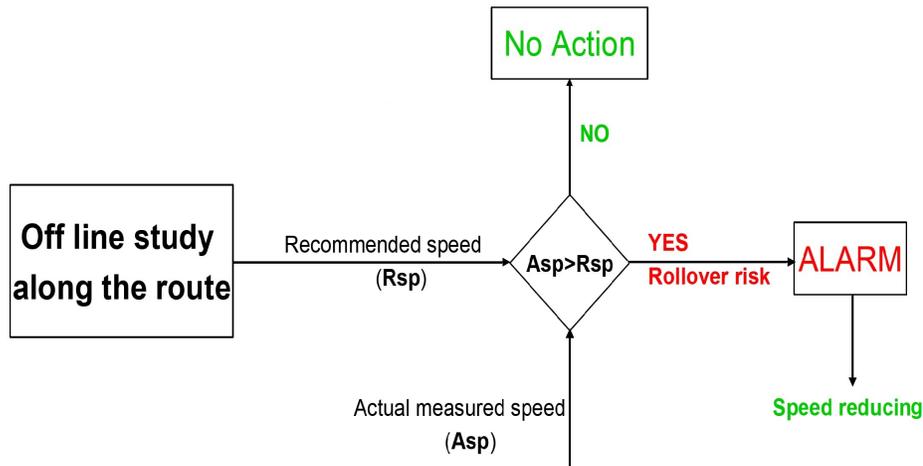


Figure 4.5: Principe de calcul de la vitesse recommandée

J'ai également été responsable d'une expérimentation sur le site d'Angers afin de tester l'algorithme développé dans ce projet, qui permet de gérer l'interdistance des PL afin d'éviter des accidents et minimiser leurs impacts sur l'infrastructure (voir figure 4.6)).

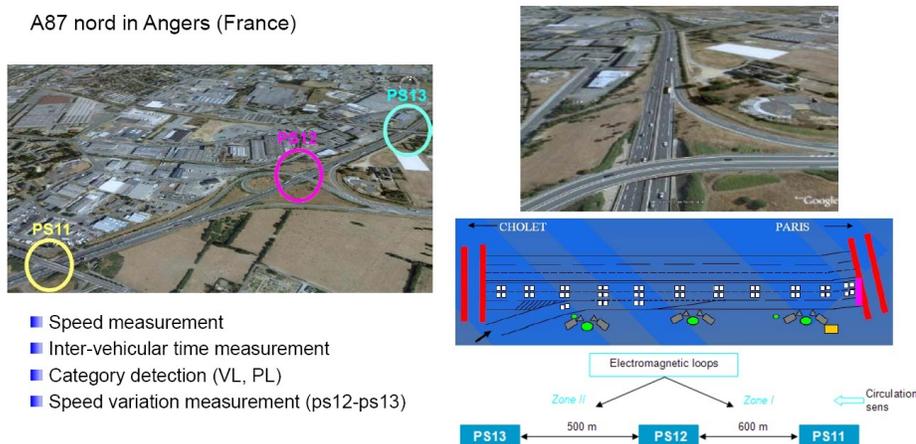


Figure 4.6: Experimentation du site SAROT

J'ai encadré, à cet effet, deux post doc. J'ai également suivi les travaux de collaboration avec l'Université de Dublin et j'ai contribué au développement de "Evolvtraffic", un logiciel de gestion de trafic.

### 4.2.3 Opération de recherche PLINFRA

Durant l'année 2007, j'ai monté l'opération de recherche PLINFRA<sup>4</sup> avec V. Cerezo, chef d'unité "adhérence" au CETE de Lyon. PLINFRA fait suite à l'opération TRUCKS à laquelle j'ai également participé. Elle a commencé officiellement le 01 Janvier 2008 pour une durée de 4 ans et a pour objectif d'étudier les possibilités d'améliorer la sécurité du trafic et des infrastructures vis à vis des risques liés aux poids lourds, et limiter les impacts du transport routier de marchandises sur les infrastructures et l'environnement.

Cet objectif se décline suivant les thèmes suivants :

1. Etude et maîtrise des risques de perte de contrôle des poids lourds pour la sécurité routière:

- amélioration de la sécurité des poids lourds sur leurs trajectoires (dispositifs embarqués, alertes...)

- adaptation de la conduite des poids lourds en fonction des caractéristiques de l'infrastructure et des conditions d'environnement (météo, visibilité, etc.)

- identification des zones à risques et des améliorations de l'infrastructure pour la sécurité des poids lourds

2. Évaluation et maîtrise des impacts des poids lourds sur l'infrastructure:

- mise en évidence des risques pour les chaussées et les ouvrages d'art face à l'accroissement des poids et dimensions et de la fréquence des poids lourds, et des évolutions de la réglementation européenne

- étude et proposition de stratégies de gestion des poids lourds sur les infrastructures pour limiter l'endommagement, les coûts de maintenance et garantir leur durabilité

3. Pesage en marche: développement de nouveaux outils et application au contrôle des surcharges

- poursuite de la mise au point et de l'expérimentation de systèmes de pesage multi-capteur

- développement et validation du système de pesage en marche par ponts instrumentés (y compris par mesures de réactions d'appui) et intégration dans le réseau national de pré-sélection des surcharges

- développement d'un système économique et fiable de pesage embarqué dans les poids lourds

4. Eco-conduite

- évaluation des impacts du trafic lourd sur l'environnement.

---

<sup>4</sup><http://or.lcpc.fr/plinfra>

J'ai un rôle d'animateur de cette opération de recherche à laquelle participent de nombreux chercheurs et ingénieurs d'IFSTTAR et des différentes équipes de recherche associées (ERA). Je suis également responsable du sujet 1 qui porte sur les études des risques et pertes de contrôle des PL.

### 4.3 Responsabilités de sous-traitances et contrats de recherche

- Responsable de la collaboration avec CERAM (Centre d'Essais et de Recherche Automobile de Mortefontaine). J'étais en charge de suivre les travaux concernant l'instrumentation d'un véhicule en vue de validation d'un système de prédiction de renversement et de l'estimation des forces d'impact.
- Responsable du contrat réalisé avec Renault Trucks afin d'instrumenter un tracteur par un ensemble de capteurs pour les mesures effectuées sur le site de Valbonne, près de Lyon.
- Responsable du contrat de recherche avec l'Université de l'UCD de Dublin, portant sur le développement de l'algorithme de gestion d'interdistance, Evolvtraffic.
- Responsable du contrat de recherche avec l'Université de Versailles portant sur l'étude de sensibilité capteurs et instrumentation du véhicule.

### 4.4 Organisation de manifestations

- Co-organisateur avec C. Dongpu de l'Université de Lancaster du workshop AHVEC "Advances in Heavy Vehicle Safety, Energy Efficiency, and Controls" <sup>5</sup>, dans le cadre de la conférence Intelligent Vehicles Symposium (IV'12), June 3-7, 2012, Alcalá de Henares, Spain.
- Membre du comité d'organisation de la conférence commune ISHVWD'10 (International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions) et ICWIM'5 (International Conference in Weigh In Motion), Marne la Vallée, 19-22 Mai 2008.
- Organisateur de la session invitée "Poids lourd et sécurité routière", Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'08, 03-05 Septembre 2008, Bucarest, Roumanie.
- Membre du comité d'organisation des 17ème Journées de Jeunes Chercheurs en Robotique, 03-04 Avril 2003 au Laboratoire de Robotique de Versailles.

---

<sup>5</sup><http://iv2012-ahvec.ifsttar.fr/>

## 4.5 Participation à des groupes de recherche

- Membre du Groupe d'échanges et de recherches IFSTTAR (GERI) sur les poids lourds et la dynamique du véhicule.
- Membre du Groupe d'échanges et de recherches IFSTTAR sur les deux roues motorisés <sup>6</sup>.
- Membre du groupe identification du GDR MACS.
- Membre du groupe GTAA (Groupe de Travail en Automatique et Automobile) du GDR MACS<sup>7</sup>.
- Membre du groupe de travail IFSTTAR/OKTAL. OKTAL est une Société spécialisée dans la simulation et la réalité virtuelle. Dans le cadre de cette convention scientifique et technique, j'interviens sur la thématique "dynamique véhicule et simulateurs" <sup>8</sup>.

---

<sup>6</sup><http://pfi-2rm.inrets.fr/>

<sup>7</sup><http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/>

<sup>8</sup><http://www.oktal.fr/>



---

## Chapitre 5

# Rayonnement

---

### 5.1 Invitation et sélection

- Guest editor à International Journal of Vehicle Design (IJVD), Special Issue on "Variable Structure Systems in Automotive Applications" <sup>1</sup>.
- Interview dans le journal "Transport Info", le magazine hebdomadaire des professionnels du transport routier<sup>2</sup>.
- Conférencier invité à VSS12, 12th International Workshop on Variable Structure Systems, India, January 12-14, 2012.
- Conférencier invité à l'Université de Lancaster, Grande Bretagne, Novembre 2011.
- Conférencier invité à l'Université de Batna, Algérie pour assurer des séminaires et des cours sur la commande et l'estimation des robots mobiles (véhicules), 22-29 Mai 2009.
- Membre du comité technique de la section "Transportation Systems", International Federation of Automatic Control (IFAC) <sup>3</sup>.
- Membre du comité scientifique de la 13eme conférence IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, September, 12-14, 2012, Sofia, Bulgaria.
- Membre du comité scientifique de la 12eme conférence IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, September, 2-4, 2009, California, USA.
- Sélection du papier publié [KID10d] dans SAE world congress 2010 parmi les meilleurs papiers et sa publication dans International Journal of Materials and Manufacturing [KID10e].
- Sélection du papier publié [IMD03] dans SAE world congress 2003 parmi les meilleurs papiers, et sa publication dans Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical

---

<sup>1</sup><http://www.inderscience.com/browse/callpaper.php?callID=1424>

<sup>2</sup><http://www.lekiosque.fr/article-994057.html>

<sup>3</sup><http://tc.ifac-control.org/7/4>

Systems [IDM03].

- Chairman de la session "Poids lourd et sécurité routière", Conférence International Francophone d'Automatique, CIFA'08, 03-05 Septembre 2008, Bucarest, Roumanie.
- Chairman de la session " All-Terrain Robots 1" durant la conférence ICRA 05, International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain.
- Co-Chairman de la session " All-Terrain Robots 2" durant la conférence ICRA 05, International Conference on Robotics and Automation, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain.
- Chairman de la session "Modelling & Estimation I" durant la conférence AVEC 04, Advanced Vehicle Control, Arnhem, Netherlands, August 23-27, 2004.

## 5.2 Participation à des Jurys de thèses et comités de suivi

### 5.2.1 Participation à des Jurys de thèses

- **2008:**

**Etudiant:** Yamine Sellami

**Sujet:** Approche fiabiliste et mécanique du comportement des poids lourds et de leur sécurité

**Date de soutenance:** 14 Novembre 2008

- **2010:**

**Etudiant:** Omar Khemoudj

**Sujet:** Développement d'un système de pesage embarqué de Poids lourd par l'estimation des forces d'impact

**Date de soutenance:** 02 décembre 2010

### 5.2.2 Membre de comités de suivi de thèses

- **Etudiant:** Yamine Sellami (2005-2008)
- **Etudiant:** Omar Khemoudj (2007-2010)
- **Etudiant:** Six Lancelot (2010-2013)

**Sujet:** Approche comparative de la modélisation de l'effet des poids lourds sur le trafic: Simulations mathématique et comportementale

- **Etudiant:** Olivier Orfila (2006-2009)

**Sujet:** Influence de l'infrastructure routière sur l'occurrence des pertes de contrôle de véhicules légers en virage: modélisation et validation sur site expérimental

### 5.3 Relecture d'articles

- Relecture d'articles à IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems
- Relecture d'articles à Journal of the Franklin Institute
- Relecture d'articles à Vehicle System Dynamics journal
- Relecture d'articles à IEEE Transactions on Vehicular Technology
- Relecture d'articles à IEEE Transactions on Industrial Electronics
- Relecture d'articles à International Journal of Systems Science
- Relecture d'articles à International Journal of Vehicle Design
- Relecture d'articles à Journal of Sound and Vibration
- Relecture d'articles aux Journées de Jeunes Chercheurs en Robotique
- Relecture d'articles dans plusieurs conférences nationales et internationales (VSS, CIFA, IFAC, ICRA, ITSC, AVEC, ACC, ECC, IV, CDC, HVTT, CISA, MED..).



---

## Chapitre 6

# Coopérations nationales et internationales

---

Après plus de 11 années dans la recherche, des coopérations nationales et internationales ont été nouées. Les principales collaborations que j'ai pu avoir et qui sont toujours en cours, sont données dans ce chapitre.

### 6.1 Coopérations nationales

- 2003- à ce jour: Université de Versailles: mes collaborations avec le professeur A. Benallegue, portent sur les aspects dynamiques de poids lourds, estimation et instrumentation. Nous avons d'ailleurs collaboré ensemble dans le cadre du projet VIF afin d'instrumenter un poids lourd et étudier sa stabilité. Publications communes: ([IDV<sup>+</sup>08], [IBMS09], [IBF09], [IMB10], [IBMS11]).
- 2003- à ce jour: Université d'Evry Val d'Essone: collaboration avec L. Nouveliere, Maître de Conférences et chercheur associé à IFSTTAR, dans le cadre de l'OR PLINFRA et du projet Calfrance, notamment sur la commande des véhicules. Nous collaborons également ensemble sur le sujet 4 de PLINFRA portant sur l'éco-conduite des PL.
- 2005- à ce jour : Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS UMR CNRS 8146). Mes collaborations avec le professeur R. Merzouki, portent sur la modélisation des véhicules deux-roues par des techniques de Bond-Graph et co-encadrement de stage de Master2, K. Belharet. Publications communes: [MBIC04].
- 2006- à ce jour: Université de Valenciennes: mes collaborations avec le professeur M. Djemai, portent sur les aspects modélisation de poids lourds et application des observateurs pour la stabilité des véhicules et co-encadrement de la thèse d'O. Khemoudj

dont il était le directeur. Publications communes: 7 publications parues ([KID09], [KID10a], [KID10d], [KID10b], [KIDF10], [KID10c], [IK11], [IDKG12]), deux revues déjà publiées ([KID10e], [KID11]) et une autre en cours de révision [KIDB11] et un ouvrage publié [IFSD11].

- 2007- à ce jour: SHERPA ENGINEERING: collaborations avec H. Shraim, docteur ingénieur, sur les applications des modes glissants à la dynamique du véhicule. Nous avons publié différents travaux. Publications dans des revues à comité de lecture ([ISF11], [SIF11], [IFS12]) et un ouvrage publié [IFSD11].
- 2009- à ce jour : Université d'Evry Val d'Essone: collaboration avec le Professeur S. Mammari qui est également chercheur associé à IFSTTAR, dans le cadre du projet CalFrance sur le platooning des poids lourds.
- 2009- à ce jour : Université d'Evry Val d'Essone: mes collaborations avec H. Arioui, maître de conférences, HDR, portent sur les aspects d'automatisation d'un véhicule de deux roues et co-encadrement de thèse de A. Khettat dans ce même contexte. Nous avons aussi co-encadré le stagiaire de Master2, K. Belharet, sur la modélisation des véhicules deux roues par des techniques basées sur le Bond Graph. Publications communes: [NKA+10].
- 2009- à ce jour : Institut d'Electronique de France (IEF): collaboration avec S. Bouaziz, Professeur à Paris12. Nous co-encadrons ensemble la thèse de A. Khettat, dont il est directeur. Publications communes: 1 publication déjà parue [KBIE11a] et une autre soumise [KBIE11b].
- 2006-2008 : Université de Paris 6 : mes collaborations avec D. Bellot, Maître de conférences, ont porté sur les aspects dynamiques de poids lourds et estimation. On a co-encadré un stagiaire de master 2, à cet effet. Publications communes: [DISB07].
- 2005-2008 : Ecole Centrale de Nantes: mes collaborations avec le professeur J. C. Cadiou ont porté sur les aspects modélisation et étude de risques liés aux poids lourds. Nous avons co-encadré la thèse de Y. Sellami dont il était le directeur. Publications communes: ([SI08], [SICH08], [SIB+08b], [SIB+08a]).

## 6.2 Coopérations internationales

- 2011-à ce jour: Université de Lancaster, Grande Bretagne: collaboration en cours avec le Dr Cao Dongpu, Associate professor, Associate Editor, Int. J. of Vehicle Design, Associate Editor, IEEE Transactions on Vehicular Technology. Nos collaborations portent sur les aspects dynamique du véhicule et aides à la conduite. J'ai déjà

présenté un séminaire à Lancaster portant sur la dynamique des PL et estimation du risque. Je l'ai également invité pour passer le mois de juin 2012 au LEPSIS. Nous co-organisons le workshop 'Advances in Heavy Vehicle Safety, Energy Efficiency and Controls', pendant la conférence IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'12).

- 2003-à ce jour: Université de Mexico, UNAM: une forte collaboration avec le professeur Leonid Fridman<sup>1</sup> qui a commencé en 2003. A cet effet, j'ai invité le professeur Fridman au LCPC pour une période d'un mois afin de travailler sur les systèmes à structures variables et application dans le domaine automobile. Ensemble, nous co-editions le numéro spécial "Variable Structure System in Automotive Application", de la revue IJVD (International Journal of Vehicle Design). J'ai également eu la chance de rencontrer le professeur Fridman à maintes reprises, notamment lors de la conférence VSS, qu'il a organisée à Mexico en 2010. Plusieurs publications communes: ([IF07], [IF08], [KIDF10], [IFM11a], [ISF11], [IFSD11], [IMF11], [IFM11b], [IFS12]).
- 2007- à ce jour: Université de Mexico, UNAM : collaboration scientifique avec le professeur Moise Arroyo, invité au LEPSIS pour une période de 12 mois. Nous avons collaboré, notamment dans le cadre du projet européen Heavyroute pour calculer l'impact des PL sur les ouvrages d'art. Publications communes: ([UIS+08], [IHO+08]).
- 2009- à ce jour : University of California, Berkeley, USA: collaboration avec Dr. Steven Shladover<sup>2</sup> dans le cadre du projet CalFrance sur le platooning des poids lourds.
- 2009- à ce jour : Université de Batna, Algérie : collaboration avec Dr. Djamel Ameddah, maître de conférences, sur les aspects modélisation, estimation, méthodes de contrôle robustes appliqués au véhicule. Nous co-encadrons à cet effet, les thèses de Saad Babesse et de Hamadi Nacer. Nous avons également monté en Algérie le projet DIAVOS: "DIAagnostic de comportement dynamique des Véhicules en vue d'Optimisation de la Sécurité routière". Publication commune: un papier soumis [HIA12].
- 2009- à ce jour : Australian Road Research Board, ARRB<sup>3</sup>: collaboration avec Mr. Anthony Germanchev, responsable de l'équipe poids lourds chez ARRB, sur les aspects pesage dynamique, et instrumentation de PL. Nous avons d'ailleurs réalisé une instrumentation du ALF (Accelerated Load Facility), à Melbourn afin de mesurer la

<sup>1</sup><http://verona.fi-p.unam.mx/~lfridman/>

<sup>2</sup>[http://www.path.berkeley.edu/People/PATH\\_Staff/shladover\\_steven.htm](http://www.path.berkeley.edu/People/PATH_Staff/shladover_steven.htm)

<sup>3</sup><http://www.arrb.com.au/home.aspx>

dynamique de ce manège de fatigue et de valider par ce fait, l'estimation de forces d'impact. Je l'ai, à cet effet invité à la soutenance d'O. Khemoudj où il a pris part au jury de thèse. Publications communes: [IDKG12].

- 2010- à ce jour: Ecole Polytechnique d'Alger: collaboration avec Dr. Hacene Derafa, enseignant chercheur. Montage d'une formation initiale en cours dans le cadre du Réseau GEII-DZ Génie Electrique, Industriel et Informatique <sup>4</sup>.
- 2010- à ce jour : Ecole Supérieur de Technologie et d'Informatique de Tunis: mes collaborations avec Dr Nahla Khraief, maître assistant, porte sur le développement d'outils basés sur les systèmes à structures variables, bifurcation et le chaos pour l'analyse des risques d'accidents des PL. Nous avons soumis le projet RAVBIT: "Risk Analysis of heavy Vehicles using Bifurcations Theory" au 7ème PCRD, actions Marie-curie, Aout 2011. Publications communes: un papier soumis [KI12].
- 2006-2010: Université collège de Dublin: collaboration scientifique avec le professeur Eugen O'brien, dans le cadre du projet européen Heavyroute. Nous avons mis au point dans le cadre de ce projet le logiciel de simulation et de gestion du trafic, EvolvTraffic. Publications communes: ([IHO<sup>+</sup>08], [IHCO08]).
- 2006-2010: Université collège de Dublin: collaboration scientifique avec Dr Colin Caprani<sup>5</sup>, dans le cadre du projet européen Heavyroute. Nous avons mis au point dans le cadre de ce projet, le logiciel de simulation et de gestion du trafic, EvolvTraffic. Publications communes: [IHCO08].
- 2006-2009 : VTI, Suède: collaboration scientifique avec Leif Sjögren, chercheur senior, dans le cadre du projet européen Heavyroute. Nous avons travaillé ensemble pour le calcul de l'impact des PL sur la chaussée. Les caractéristiques de l'infrastructure sont, à cet effet, mesurées. Publications communes: ([UIS<sup>+</sup>08], [IHO<sup>+</sup>08], [FEI<sup>+</sup>08], [SIH08], [ISI<sup>+</sup>09]).
- 2006-2009 : VTI, Suède : collaboration scientifique avec Anita Ihs, chercheur senior, dans le cadre du projet européen Heavyroute. Nous avons collaboré dans la thématique prédiction du risque de renversement où nous avons réalisé des simulations avec le simulateur PL du VTI afin de calculer le temps à renversement du PL (Time To Rollover). Nous avons ensuite comparé ces résultats de simulation à ceux donnés par le système de prédiction que nous avons développé dans le cadre du projet Heavyroute. Publications communes: ([UIS<sup>+</sup>08], [IHO<sup>+</sup>08], [FEI<sup>+</sup>08], [SIH08], [ISI<sup>+</sup>09]).

---

<sup>4</sup><http://www.nasr-dz.org/geii.php>

<sup>5</sup><http://www.colincaprani.com/>

- 2006-2009: ARSENAL, Autriche: collaboration scientifique avec Stefan Deix, chercheur senior, dans le cadre du projet européen Heavyroute. Nous avons principalement travaillé ensemble sur l'impact des PL sur les ouvrages d'art. Publications communes: ([UIS+08], [IHO+08], [FEI+08], [ISI+09]).

## **Partie II**

# **Synthèse des activités de recherche**

---

## Chapitre 7

# Etude et maîtrise des risques de perte de contrôle des poids lourds

---

### 7.1 Introduction

Depuis ma nomination comme chargé de recherche en février 2005, au sein du LEPSIS à IFSTTAR, j'ai pris en charge l'activité dynamique poids lourd et je continue à la développer.

Mes recherches ont porté sur le développement des outils d'aides à la conduite des poids lourds afin de minimiser les risques d'accidents tels que le renversement, la mise en portefeuille ou encore la sortie de voie. Une compréhension fine et précise du comportement du poids lourd est donc nécessaire. Pour y arriver, différents modèles de dynamiques de poids lourds sont développés, simulés et analysés.

Parallèlement à ces travaux, j'ai commencé en 2007, dans le cadre de la thèse de Omar Khemoudj, une thématique concernant l'estimation de la charge dynamique du PL. Cette dernière constitue une information de première importance puisqu'elle permet, une fois connue, d'éviter les surcharges, et de ce fait, limiter l'impact dynamique du poids lourd sur l'infrastructure. La connaissance de la charge permet également d'alimenter le système de prédiction de renversement par l'information sur le transfert de charge et calculer par ce fait le risque renversement.

D'autres applications à cette estimation sont détaillées dans ce mémoire.

L'identification des zones à risques et des améliorations de l'infrastructure pour la sécurité des poids lourds est l'autre aspect de mes recherches. Le calcul d'une vitesse maximale à envoyer au chauffeur sur des zones susceptibles d'être dangereuses est l'une des réponses à cette problématique. Cependant, l'étude du comportement du poids lourd et le développement de systèmes d'alerte ne peut se faire sans une connaissance préalable de

la base de données d'infrastructure (dévers, pente, rayon de courbure, uni, adhérence...). Celle-ci ne peut être mesurée que sur des itinéraires bien connus. L'estimation de ces caractéristiques ou du moins quelques unes d'entre elles pour étudier leur influence sur la dynamique du poids lourd, constitue une autre thématique à laquelle je me suis intéressé. Elle consiste à développer un système capable en fonction de la dynamique du véhicule et de la disponibilité de quelques mesures capteurs, et en se basant sur des estimateurs, tels que les observateurs à modes glissants ou le filtre de kalman étendu, de reconstruire en temps réel quelques paramètres de l'infrastructure, tel que l'uni de la chaussée ou l'adhérence, et ceci sur tout le trajet que fait le poids lourd. C'est une recherche qui fait suite à mes travaux de thèse sur l'estimation on-line du profil de route. Cette estimation a été validée par des mesures faites par APL et a fait l'objet d'une publication dans International Journal of Vehicle Design, en 2008 [IF08] et une autre à la conférence IEEE Intelligent Vehicles Symposium, en 2007, en Turquie [IF07].

D'autre part, les études citées précédemment, considèrent que les paramètres dynamiques du poids lourds et les caractéristiques de l'infrastructure sont bien connus et invariables dans le temps. C'est pourquoi nous nous sommes intéressés à une problématique aussi importante, qui est celle de l'approche fiabiliste et mécanique du comportement des poids lourds et de leur sécurité. Cette recherche consiste à détecter les risques et les modes de défaillance du poids lourd et de générer une alerte au chauffeur. En se basant sur une modélisation probabiliste des caractéristiques du poids lourd, de l'infrastructure et de l'environnement, celle-ci permet de prendre en compte les aléas de chacune de ces entités. Dans un premier temps une modélisation par variables aléatoires est réalisée, et les lois des variables de base du modèle sont estimées. Les techniques de la théorie de la fiabilité des structures sont mises en œuvre pour estimer les probabilités de défaillance (perte de contrôle), vis à vis des divers états limites. Ensuite, la théorie des processus stochastiques a été utilisée pour une approche par la dynamique aléatoire du problème. Parmi les aléas qui sont considérés pour le véhicule, Nous citons ses caractéristiques mécaniques, sa charge, la hauteur du centre de gravité ainsi que les caractéristiques du pneumatique ; et pour l'infrastructure et son environnement, on a considéré l'adhérence, le dévers et le profil en long de la chaussée. Les risques d'accident et la pertinence des alertes sont étudiés en utilisant les outils de la théorie de la fiabilité des systèmes. J'ai, à cet effet, encadré un travail de thèse intitulée "Approche fiabiliste et mécanique du comportement des poids lourds et de leur sécurité" de Yamine Sellami. Nous avons mis en œuvre des outils de la fiabilité afin de réaliser la modélisation de poids lourds par approche probabiliste et la génération d'alerte en cas de risque de renversement.

Par ailleurs, les modèles de poids lourds développés, sont associés à un module de contrôle commande afin de corriger les situations accidentogènes telles que la sortie de voie, ou le renversement, une fois que celles-ci sont prédites par les systèmes d’alerte déjà développés ou en cours de réalisation. Cette thématique de recherche présente des résultats satisfaisants que nous présentons dans ce mémoire.

## 7.2 Étude du comportement du PL et adaptation de sa conduite

### 7.2.1 Contribution à la modélisation du PL/Infrastructure

Durant ces dernières années, plusieurs modèles de PL sont développés en fonction de l’application à laquelle on s’intéressait. Nous citons celui d’un modèle à un essieu, le modèle d’un tracteur à 5 degrés de liberté (*ddl*), et le modèle du tracteur semi-remorque à 12 *ddl*. Soulignons que la définition du poids lourds inclut les véhicules utilitaires, seuls ou avec remorques, de plus de 3,5 tonnes de poids total autorisé en charge, et les tracteurs routiers seuls ou avec remorque. Nous nous sommes inspirés des différents travaux que nous trouvons dans la littérature, en commençant par le travail de M. Bouteldja, ancien doctorant au laboratoire, actuellement chargé de recherche au CETE de Lyon [Bou05]. D’autres travaux traitant la modélisation du véhicule poids lourd peuvent être trouvés dans ([Pfl86], [Ceb93], [CT95], [AO99], [YRS01],[Ibr04a], [Ibr04b], [TT04], [IHO+08], [KID10d]).

Parmi les modèles que nous avons développés, nous présentons dans ce mémoire celui du tracteur semi-remorque, constitué de 12 *ddl* et composé de 2 essieux pour le tracteur et 1 essieu pour la remorque. Ce modèle est représenté sur la figure 7.7.

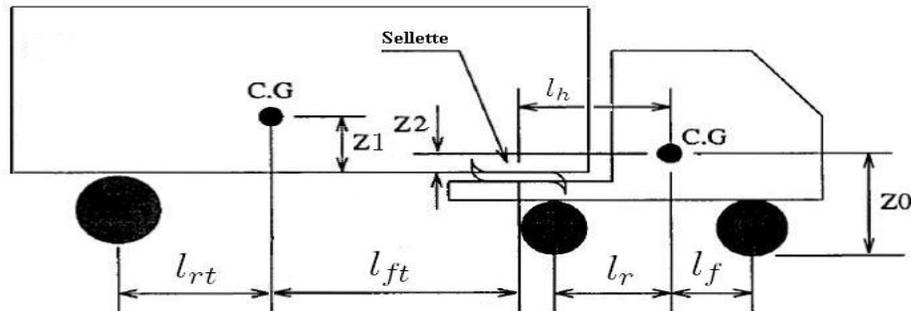


Figure 7.7: Tracteur semi-remorque

La force au niveau de la sellette qui est une force interne au véhicule articulé apparaît comme une force externe pour le tracteur et la remorque. De plus, cette force est

représentée par deux composantes: une composante longitudinale notée  $X_h$  et une composante latérale notée  $Y_h$ . On note  $F_{fx}$  et  $F_{fy}$  respectivement les forces longitudinales et latérales à l'avant du tracteur,  $F_{rx}$  et  $F_{ry}$  représentent respectivement les forces longitudinales et latérales à l'arrière du tracteur,  $\ddot{x}$  et  $\ddot{y}$  sont respectivement les accélérations longitudinales et latérales du tracteur,  $l_f$  et  $l_r$  représentent respectivement les distances entre le centre de gravité et l'essieu avant et arrière du tracteur,  $l_{ft}$  correspond à la distance entre le centre de gravité de la remorque et le point de sellette et  $l_{rt}$  correspond à la distance entre le centre de gravité et l'essieu équivalent de la remorque,  $\delta$  représente l'angle de braquage à la roue,  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  correspondent respectivement l'angle de lacet du tracteur et l'angle de lacet de la remorque et  $\theta$  représente l'angle de lacet relatif entre le tracteur et la remorque comme indiqué sur la figure 7.8.

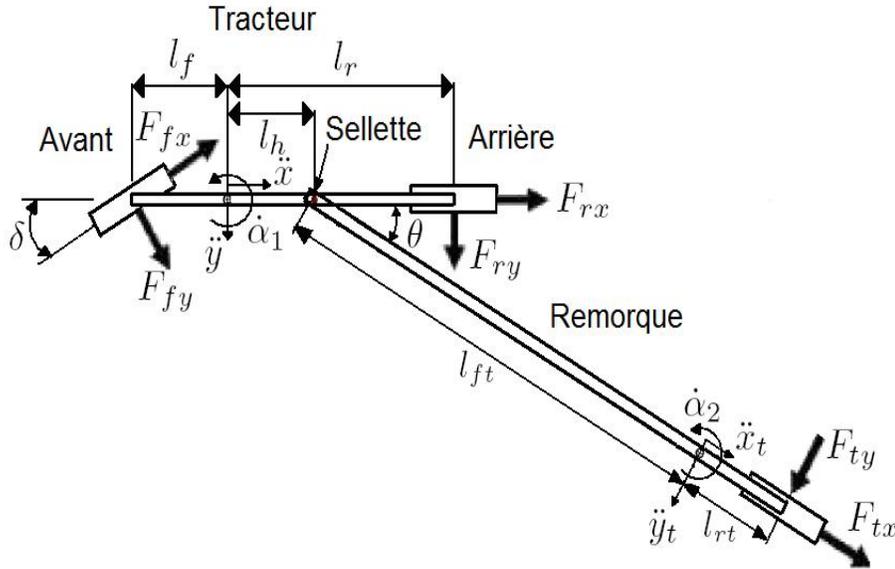


Figure 7.8: Modèle de tracteur semi-remorque

Le modèle de suspension est modélisé par une combinaison de raideurs et d'amortisseurs illustré sur la figure 7.9.

Les équations de mouvement du tracteur sont données, dans l'axe longitudinal par:

$$F_{fy} \sin(\delta) + F_{fx} \cos(\delta) + F_{rx} - X_h = M_1 \ddot{x} \quad (7.1)$$

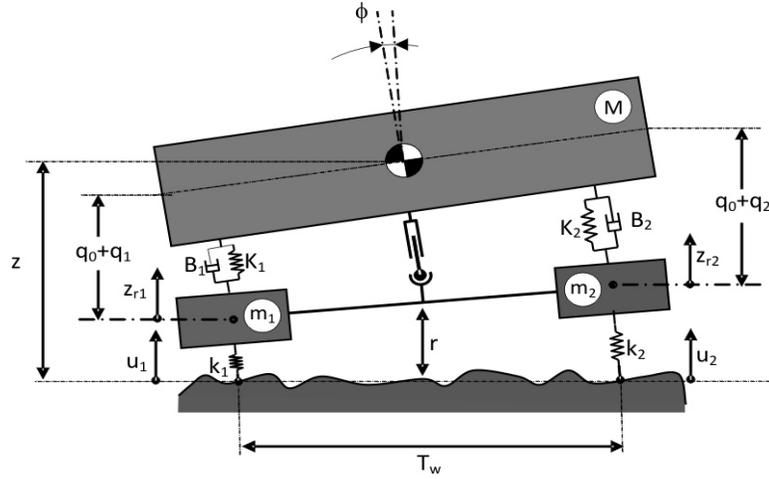


Figure 7.9: Description du modèle de suspension du PL

dans la direction latérale:

$$F_{fy} \cos(\delta) - F_{fx} \sin(\delta) + F_{ry} - Y_h = M_1 \ddot{y} \quad (7.2)$$

Le moment de lacet du tracteur autour du point de sellette est donné par :

$$(l_f + l_h)(F_{fy} \cos(\delta) - F_{fx} \sin(\delta)) - (l_r - l_h)F_{ry} = I_{z1} \ddot{\alpha}_1 \quad (7.3)$$

Le paramètre  $I_{z1}$  est le moment d'inertie du tracteur autour de l'axe vertical passant par la sellette. Il est obtenu en utilisant le théorème de Huyghens :  $I_{z1} = I_{zloc} + M_1 l_h^2$  où  $I_{zloc}$  est le moment d'inertie autour de l'axe vertical passant par le centre de gravité du tracteur,  $M_1$  est la masse totale du tracteur,  $l_h$  est la distance entre le centre de gravité du tracteur et le point de sellette.

La dynamique de la remorque est donnée par un ensemble d'équations:

dans le sens longitudinal :

$$X_h + F_{tx} \cos(\theta) - F_{ty} \sin(\theta) = M_2(\ddot{x}_t \cos(\theta) - \ddot{y}_t \sin(\theta)) \quad (7.4)$$

dans le sens latéral :

$$Y_h + F_{tx} \sin(\theta) + F_{ty} \cos(\theta) = M_2(\ddot{x}_t \sin(\theta) + \ddot{y}_t \cos(\theta)) \quad (7.5)$$

et la dynamique de lacet :

$$(Y_h \cos(\theta) - X_h \sin(\theta))l_{ft} - F_{ty}l_{rt} = I_{z2} \ddot{\alpha}_2 \quad (7.6)$$

où  $M_2$  et  $I_{z2}$  représentent respectivement la masse et le moment d'inertie de la remorque autour de l'axe vertical passant par son centre de gravité,  $\ddot{x}_t$  et  $\ddot{y}_t$  sont les accélérations longitudinale et latérale de la remorque,  $\ddot{\alpha}_1$  et  $\ddot{\alpha}_2$  sont respectivement les accélérations de lacet du tracteur et de la remorque.

Les équations de rotation des roues sont données par :

$$\begin{cases} I_{fw}\dot{\omega}_{fw} = \Gamma_{fw} + r_w F_{fx} \\ I_{rw}\dot{\omega}_{rw} = \Gamma_{rw} + r_w F_{rx} \\ I_{tw}\dot{\omega}_{tw} = \Gamma_{tw} + r_w F_{tx} \end{cases} \quad (7.7)$$

avec  $I_{fw}$ ,  $I_{rw}$  et  $I_{tw}$  sont respectivement les inerties en rotation des roues avant et arrière du tracteur ainsi que celle de la remorque. Le rayon  $r_w$  est supposé constant pour toutes les roues.  $\Gamma_{fw}$ ,  $\Gamma_{rw}$  et  $\Gamma_{tw}$  sont respectivement les couples avant et arrière du tracteur et le couple arrière de la remorque.

Les accélérations verticales des roues gauche et droite de l'avant du tracteur peuvent être calculées en utilisant le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} \ddot{z}_{r1} = (B_1\dot{q}_1 + K_1\frac{T_w}{2}\sin(\phi) + B_1\frac{T_w}{2}\cos(\phi)\dot{\phi} \\ \quad + K_1q_1 - k_1z_{r1} + k_1u_1)/m_1 \\ \ddot{z}_{r2} = (B_2\dot{q}_2 - K_2\frac{T_w}{2}\sin(\phi) - B_2\frac{T_w}{2}\cos(\phi)\dot{\phi} \\ \quad + K_2q_2 - k_2z_{r2} + k_2u_2)/m_2 \end{cases} \quad (7.8)$$

Les déplacements verticaux des roues gauche et droite de l'avant du tracteur ( $z_{r1}$ ,  $z_{r2}$ ) peuvent être calculés de la façon suivante:

$$\begin{cases} z_{r1} = z - q_1 - \frac{T_w}{2}\sin(\phi) - r_w \\ z_{r2} = z - q_2 + \frac{T_w}{2}\sin(\phi) - r_w \end{cases} \quad (7.9)$$

où ( $q_1$ ,  $q_2$ ) sont respectivement les débattements de suspension avant gauche et droit du tracteur,  $\phi$  est l'angle de roulis,  $T_w$  est la largeur de l'essieu.

A partir de l'équation (7.9), la hauteur du centre de gravité  $z$  peut être déduite de la façon suivante:

$$z = \frac{1}{2}(z_{r1} + z_{r2} + q_1 + q_2) + r_w \quad (7.10)$$

La connaissance des forces généralisées au contact entre la route et la roue est très importante pour la description de la dynamique du poids lourd.

Les forces verticales  $F_{ni}$ ,  $i = 1..6$  qui agissent sur les roues sont calculées en utilisant l'expression suivante:

$$F_{ni} = F_{ci} + k_i(u_i - z_{ri}), \quad i = 1..6 \quad (7.11)$$

où  $F_{ci}$  est la charge statique et  $u_i$  représente l'entrée d'uni sous chaque roue.

Nous pouvons donc écrire les équation de mouvement du poids lourd par:

$$M(q) \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \dot{q} + K(q) = F_g \quad (7.12)$$

où  $M \in \mathfrak{R}^{12 \times 12}$  est la matrice d'inertie (matrice de masses),  $C \in \mathfrak{R}^{12 \times 12}$  représente l'effet d'amortissement,  $K \in \mathfrak{R}^{12}$  est le vecteur de raideurs,  $F_g \in \mathfrak{R}^{12}$  est constitué des forces généralisées et  $q \in \mathfrak{R}^{12}$  est le vecteur de coordonnées généralisées:

$$q = [x, y, z, \phi, \alpha_1, \theta, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6]^T \quad (7.13)$$

où  $(q_3, q_4)$  sont respectivement les débattements de suspension arrière gauche et droit du tracteur,  $(q_5, q_6)$  sont respectivement les débattements de suspension gauche et droit de la remorque,  $x, y, z$  représentent respectivement le déplacement longitudinal, latéral et vertical de la masse suspendue.

### 7.2.2 Validation des modèles

Les différents modèles de poids lourds développés dans le cadre de mes recherches ont été validés par différentes manières. D'abord par simulation en utilisant le logiciel de simulation dynamique PROSPER développé par la société SERA-CD.

Le logiciel PROSPER a été lui même validé par des expérimentations réalisées en collaboration entre le LCPC, le LR de Trappes et l'ETAS (Etablissement Technique d'Angers dépendant de la Délégation Générale de l'Armement) ([DSD03], [Del04]).

Pour ce faire, un poids lourds de l'ETAS de type RVI TRM 10000 en trois configurations a été instrumenté comme le montre la figure 7.10.



Figure 7.10: Expérimentation en vue de la validation du logiciel PROSPER

Une série d'essais a été réalisée en sollicitations transversales pour caler et corriger les paramètres. Les résultats de ces expérimentations peuvent être trouvés dans [DSD03].

Nous avons également validé nos différents modèles par des expérimentations que nous allons présenter dans les chapitres suivants.

## 7.2.3 Interaction PL/infrastructure et adaptation de la conduite du PL

### 7.2.3.1 Communication PL/Infra et échange d'information

La communication entre le PL et l'infrastructure constitue un élément qui s'avère très important pour l'aide à la conduite du véhicule. En effet, les échanges d'information entre le véhicule et l'infrastructure contribue à informer le chauffeur des risques qui peut encourir, et de ce fait, l'aide à changer son comportement pour éviter un accident. Dans le cadre du projet VIF, nous avons réalisé et mis au point avec l'équipe du CETE de l'EST un système interactif : Poids lourd/Infrastructure/Centre de contrôle permettant d'évaluer les conditions d'accès du poids lourd à l'infrastructure, en fonction de sa charge, les informations sur le trafic et les conditions météorologiques. L'autorisation ou l'interdiction d'accès du poids lourd à certaines zones de route est alors décidée ([ID06a], [ISGR08], [IDV+08], [FEI+08], [ISIH08]). Des techniques de communications sans fils sont utilisées pour assurer la communication entre les trois entités afin d'échanger des informations.

Ce système est fonction des caractéristiques de l'infrastructure tels que l'uni, le rayon de courbure, le dévers, la pente, etc..et du véhicule tels que son poids, sa hauteur, son nombre d'essieux, etc...qui sont mesurées par une station de pesage en marche (WIM) ([MN96], [Jac98], [JOJ05]).

Les paramètres mesurés par la station de pesage sont:

- la vitesse du véhicule
- sa longueur totale
- la longueur de chaque essieu
- l'interdistance avec le véhicule qui précède
- poids total
- la catégorie du véhicule

Les données enregistrées dans la base du PC sont:

- hauteur maximale autorisée
- interdistance minimale à respecter
- poids maximal d'essieu à respecter

Le système interactif développé est illustré sur la figure 7.11.



Figure 7.11: Communication Véhicule et système WIM : (1) Identification du véhicule, (2) Dialogue Véhicule et le système WIM, (3) Fin de communication

Plusieurs algorithmes sont développés et intégrés dans le système WIM pour gérer les interdistances, pour mesurer la charge de véhicule lourd, et pour envoyer des messages au conducteur.

Les messages peuvent être des alertes ou des informations, par exemple sur la surcharge.

Les messages suivants sont notamment conçus :

- « Réduisez votre vitesse » : selon les caractéristiques de la route et du véhicule, une vitesse maximum est calculée par le système WIM et envoyée au conducteur,
- « Augmentez votre interdistance » : La gestion d'interdistance entre véhicules constitue une problématique majeure de la sécurité routière. L'objectif est double:
  - éviter le risque de collision
  - réduire l'impact des PL sur l'infrastructure

Si l'interdistance du véhicule avec celui qui le précède, principalement en ce qui concerne la charge longitudinale équivalente, uniformément distribuée, par exemple le poids brut de chaque véhicule, est trop courte pour traverser un pont donné, une interdistance minimum est donnée au conducteur avec l'alerte suivante:

- « Accès interdit » : en raison d'une surcharge avant un pont ou avant une route à basse capacité, même temporairement, par exemple en période de dégivrage, ou d'une taille de véhicule supérieure par rapport à un dégagement de pont, un message est envoyé pour inviter le véhicule à changer son itinéraire.

Ces messages sont composés et affichés par des icônes sur un écran dans le véhicule.

L'information de surcharge envoyée au conducteur est marquée par un indice de confiance. Selon cet indice, les données peuvent être enregistrées dans le véhicule. Pour identifier une surcharge, le poids brut du véhicule ou les charges des essieux mesurées par le système WIM sont comparés aux poids et aux charges maximum autorisés du véhicule indiqué.

### 7.2.3.2 Gestion d'interdistance

Le but de ce travail de recherche est d'adapter la conduite des PL et de gérer leurs vitesses, et de ce fait leurs interdistance en fonction de leur impact sur l'infrastructure et sur la sécurité routière.

Dans le cadre du projet européen Heavyroute, un algorithme de gestion d'interdistance des PL a été développé et des tests sur site ont été réalisés ([UIS+08], [FEI+08], [SIH08]).

L'expérimentation réalisée sur le site de SAROT à Angers en collaboration avec l'équipe de recherche associée ERA 17, permet d'analyser le comportement des chauffeurs vis à vis d'un changement de signalisation d'interdistance entre PL.

Le site est équipé de boucles électromagnétiques afin de :

- mesurer les vitesses des véhicules,
- mesurer les temps inter-véhiculaires,
- détecter la catégorie des véhicules (PL, VL, Moto,...).

La section de route sélectionnée est une  $2 \times 2$  voies réservée, avec une vitesse maximale de  $90\text{km/h}$ . A cette vitesse, la distance parcourue en  $2\text{s}$  est de  $50\text{m}$ .

Pour cette expérimentation, nous avons fixé une interdistance maximale de  $70\text{m}$  pour tous les véhicules ayant un PTRA (Poids Total Autorisé)  $> 3.5$  Tonnes.

Ce choix est dû au fait que cette distance:

- est différente de celle fixée par la réglementation routière qui est de  $50\text{m}$ ,
- reste acceptable par les chauffeurs, en vue du questionnaire que nous avons réalisé sur un panel de 50 chauffeurs de différentes nationalités.

Pour ce faire, nous avons modifié le panneau de signalisation comme montré sur la figure 7.12.

Il est installé approximativement à  $450\text{m}$  de l'entrée de la zone PR 3+950 des deux côtés de la route comme illustré sur la figure 7.13

Nous avons pu enregistrer les données du trafic pour voir si les chauffeurs ont respecté cette nouvelle réglementation et ainsi analyser leur comportement. Nous avons remarqué que 12% des conducteurs ne respectaient pas la consigne d'interdistance de  $70\text{m}$  et 7% d'entre eux ne respectaient même pas la distance réglementaire de  $50\text{m}$ .

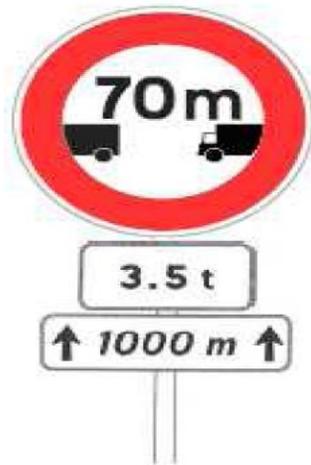


Figure 7.12: Le panneau modifié selon l'expérimentation

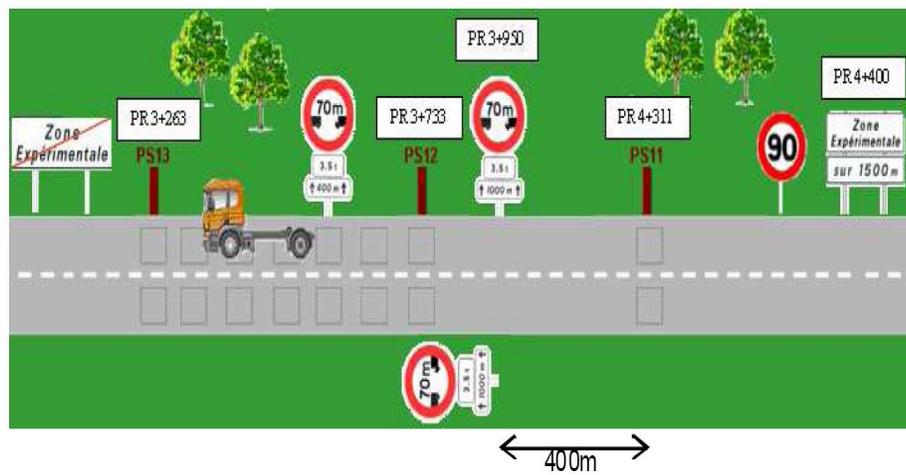


Figure 7.13: Description de l'expérimentation

Les résultats ont cependant montré, que dans le cas d'une météo dégradée, ces chiffres se réduisent sensiblement, chose qui prouvent que les conducteurs sont plus prudents dans ces conditions. Malheureusement nous n'avons pas pu aller jusqu'au bout de cette expérimentation afin de tester le logiciel de gestion d'interdistance en temps réel et sur route.

### 7.3 Amélioration de la sécurité des poids lourds: développement de dispositifs embarqués et d'alertes pour l'aide à la conduite des PL

Cette thématique consiste à développer des outils d'aide à l'amélioration de la sécurité routière relative aux poids lourds. En effet, l'implication des poids lourds dans la sécurité routière se traduit souvent par la gravité des accidents et non par leur nombre.

Les statistiques montrent que les accidents impliquant de tels véhicules sont plus graves que ceux des véhicules légers (VL). Le nombre de morts dus à des accidents impliquant un PL est deux fois supérieur à celui relatif à des accidents de VL ([ONI05], [DG08]).

Alors qu'ils constituent seulement 3% des véhicules en circulation, les poids lourds représentent 10% des véhicules impliqués dans des accidents mortels (13% des accidents liés aux PL sont mortels contre 6% pour les VL, et 85% des tués ne sont pas des usagers de PL)) (voir le tableau de la figure 7.14).

	PL	VL
Accidents mortels	13%	6%
Accidents graves	36%	29%
% des tués (en 6 jours)	15% des usagers de PL	62% des usagers de VL

Figure 7.14: Répartition des accidents mortels selon le type de véhicules impliqués

La gravité des accidents de poids lourds est due principalement aux raisons suivantes :

- le contrôle du PL est beaucoup plus difficile que celui du VL,
- la dynamique est plus complexe à cause de sa structure, surtout lorsqu'il s'agit d'un PL articulé ou à plusieurs essieux,
- la dynamique du PL est moins stable à cause de ses caractéristiques particulières (hauteur du centre de gravité par rapport à la largeur des essieux, cas de surcharge du

véhicule, charge liquide provoquant de ballants pour les véhicules citernes, type des suspensions arrière, présence d'articulation induisant un risque de mise en portefeuille lors d'un ralentissement brutal. . . ),

- à cause de son poids: le PL présente une énergie cinétique plus élevée. Ce qui conduit à un allongement de la distance de freinage du véhicule et une augmentation du risque lors d'un éventuel choc.

Le plus souvent, les accidents ont lieu sur des routes nationales et départementales, et résultent principalement des cas de renversement, de collision, et de mise en portefeuille.

Des études démontrent que l'erreur humaine est à l'origine de 90% des accidents de la route. En effet, une courte inter-distance entre véhicules, un passage à une vitesse supérieure à celle admise dans un virage serré ou en sortie d'autoroute, peuvent mener à des situations dangereuses. Les systèmes d'aide à la conduite s'avèrent être nécessaires pour éviter ces situations à risques.

Pour répondre à cette problématique, les exigences sur les règles de conduite forment aussi des solutions préventives efficaces. Par exemple, pour obtenir un permis de conduire, le chauffeur de poids lourd doit connaître les risques probables de son véhicule et les bases de la conduite d'anticipation, bien savoir équilibrer et répartir le chargement de son véhicule, savoir agir sur les freins pour éviter les situations de mise en portefeuille, contrôler la vitesse dans les conditions atmosphériques difficiles pour éviter la sortie de voie, vider ou remplir entièrement les compartiments pour éviter les phénomènes de ballant, . . . etc.

Par ailleurs, beaucoup de travaux de recherche ont eu lieu pour l'amélioration des aspects techniques de prévention, en particulier pour alerter ou assister le conducteur. Cependant, la plupart de ces systèmes sont basés sur des approches déterministes où une marge de sécurité est introduite pour compenser la perte d'information au niveau de l'évaluation. Néanmoins, cette marge est généralement définie par des tests pratiques ou par des valeurs limites bornant les données incertaines. Ceci conduit dans certaines situations à une mauvaise évaluation du risque. D'autre part, si le comportement dynamique du poids lourd et les paramètres de l'infrastructure étaient parfaitement connus, il serait possible d'accepter une conduite en limite de sécurité. Par contre, si cette connaissance n'est pas parfaite, le risque d'accident sera plus élevé et le conducteur devra réduire ce risque par divers procédés, par réduction de vitesse par exemple. De ce fait, il est important de prendre en compte les incertitudes les plus pertinentes dans l'évaluation du risque.

### 7.3.1 Observation, estimation et prédiction du risque

Cette thématique traite des dispositifs d'alerte qui sont développés afin d'aider le conducteur à éviter un risque d'accident. Deux approches sont étudiées: approche déterministe et approche probabiliste.

#### 7.3.1.1 Approche déterministe

Nous nous sommes intéressés ici au risque le plus répandu pour les PL, qui est le renversement ([ASK<sup>+</sup>92], [AO99], [CP99a], [CP99b], [GEGK01], [AO03], [IES<sup>+</sup>07], [Imi08]). Afin de le prédire et de l'éviter, nous avons développé un certain nombre d'outils et de méthodes basés sur l'observation et l'estimation du comportement du PL. Ces méthodes utilisent des capteurs informatiques de type, observateurs de Luenberger, observateurs à modes glissants, filtre de kalman et filtre de kalman étendu afin d'observer les états non mesurés du véhicule, identifier ses paramètres et prédire les risques d'accident ([Lev98], [BDB02], [PB02], [ACRM04], [DFL05], [SCM05], [Imi07], [ID07b], [VdNFM08], [FDL08], [DVCL10]). A cet effet, nous avons comparé deux méthodes d'estimation qui sont le filtre de kalman et l'observateur à modes glissants. Une analyse de robustesse des deux méthodes a été réalisée. Les résultats de cette étude comparative ont été publiés et présentés durant la conférence ECC 2007 [DISB07].

Dans ce qui suit, je présente une application de ce type de capteurs, en l'occurrence les observateurs à modes glissants pour prédire le risque de renversement du PL. Comme c'est expliqué dans [Utk77], l'intérêt de ce genre d'observateurs réside sur leur robustesse par rapport aux perturbations, aux erreurs de modélisation et aux incertitudes paramétriques. Ils ont également la spécificité d'être facile à implémenter pour des essais en temps réel.

Un système d'anti-renversement est ainsi développé, dans le cadre du projet VIF ([ID06c], [ID07a], [IDV<sup>+</sup>07], [IRR<sup>+</sup>08], [IBMS09]). Il est illustré sur la figure 7.15.

Ce système de prédiction est composé de plusieurs blocs:

- Base de données infrastructure: les caractéristiques de l'infrastructure sont préalablement mesurées et stockées dans une base de données intégrée dans le véhicule. Cette base est composée de l'uni, du rayon, de la pente, du dévers et de l'adhérence de la chaussée,
- Modèle du PL: un modèle décrivant le comportement du PL est développé, comme expliqué dans le chapitre précédent,
- Entrées: les entrées du modèle sont constituées de l'angle de braquage, des couples moteur et de freinage. Le véhicule étant équipé de plusieurs capteurs, les signaux issus de ces derniers constituent les entrées du bloc observateur/estimateur,

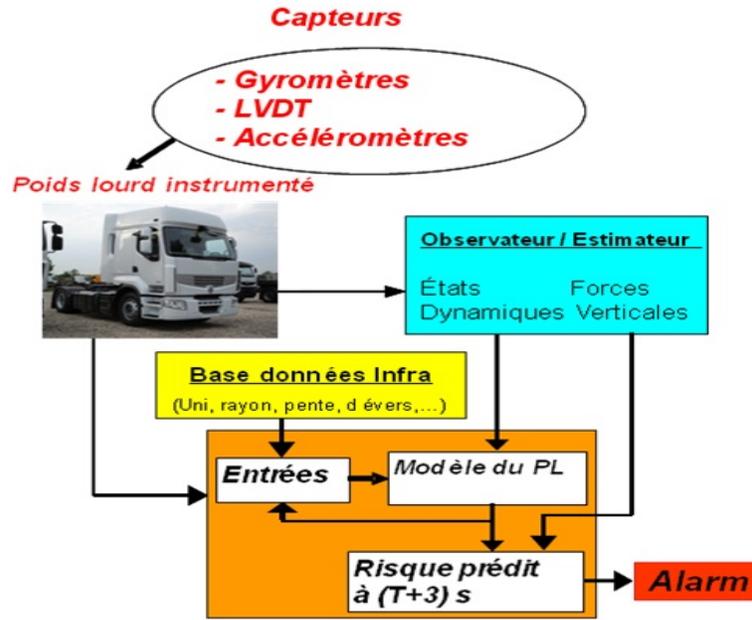


Figure 7.15: Système de prédiction de renversement

- Observateur/Estimateur: dans ce bloc, un observateur et un estimateur sont développés pour observer les états dynamiques du PL et estimer les forces d'impact,

- Système de prédiction: ce système calcule et prédit le risque qu'encourt le PL.

Cette prédiction se fait à l'instant  $(t + 3)s$  pour permettre au chauffeur d'avoir suffisamment de temps pour réagir et ainsi éviter le renversement ([ID08], [Imi09]). Ce bloc permet également de calculer une vitesse limite et de l'envoyer au chauffeur en même temps qu'une alarme, comme schématisé sur la figure 7.16.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de ce dispositif, je présente dans ce qui suit les algorithmes développés.

Sous forme d'états, le modèle du tracteur peut être écrit sous la forme suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(F_g - B(x_1, x_2)x_2 - K(x_1)) \end{cases} \quad (7.14)$$

où  $M \in \mathfrak{R}^{5 \times 5}$  est la matrice d'inertie,  $B \in \mathfrak{R}^{5 \times 5}$  est la matrice de coriolis,  $K \in \mathfrak{R}^5$  est le vecteur de raideurs,  $F_g \in \mathfrak{R}^5$  représente le vecteur de forces généralisées,  $x = (x_1, x_2)^T = (q, \dot{q})^T$  est le vecteur d'état et  $x_1 = [q_1, q_2, q_3, q_4, \phi]^T$  est le vecteur composé des différentes mesures.

L'angle de roulis est calculé de la manière suivante:

$$\phi = \arcsin\left(\frac{q_1 - q_2}{T_w}\right) \quad (7.15)$$

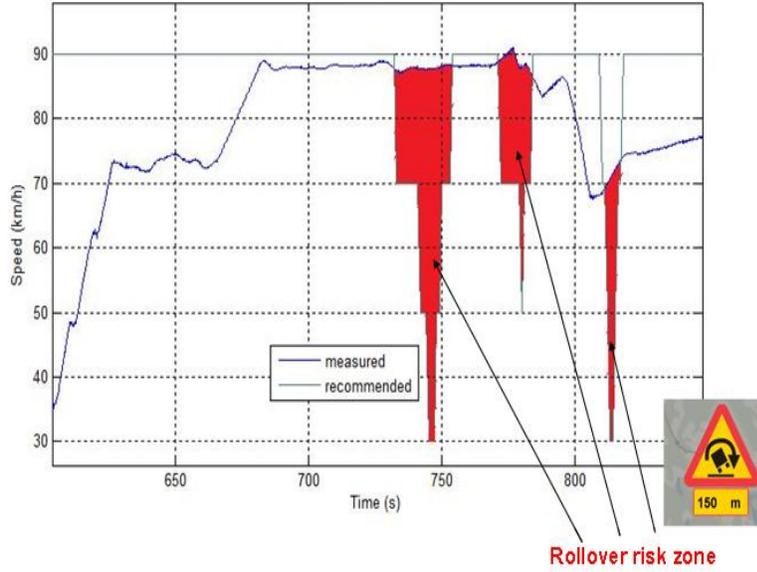


Figure 7.16: Exemple de vitesse recommandée calculée par le système de prédiction du risque

Afin d'observer les états et estimer les forces d'impact qui sont nécessaires pour détecter le risque de renversement, l'observateur d'ordre supérieur suivant est développé:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 - \lambda_0 \nabla(v_1) \text{Sign}(\hat{x}_1 - x_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_3 - \lambda_1 \nabla(v_2) \text{Sign}(\hat{x}_2 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_3 = -\lambda_2 \text{Sign}(\hat{x}_3 - \dot{\hat{x}}_2) \end{cases} \quad (7.16)$$

où  $\hat{x}_1$ ,  $\hat{x}_2$  et  $\hat{x}_3$  sont respectivement les estimées de  $x_1$ ,  $x_2$  et  $\dot{x}_2$ ,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les gains de l'observateur. Plus de détails sur cet observateur peuvent être trouvés dans [FLD08].

L'observateur défini dans (7.16) permet d'estimer les positions, les vitesses et les accélérations du système en temps fini. Le jerk du système est borné et satisfait l'inégalité suivante:

$$f^+ \geq 2 \max(\ddot{x}_{1_i}), i = 1..5 \quad (7.17)$$

avec  $f^+$  est une constante définie positive.

La dynamique de l'erreur d'estimation est calculée en utilisant les équations (7.14) et (7.16):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = x_2 - \hat{x}_2 + \lambda_0 \nabla(v_1) \text{Sign}(v_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \dot{x}_2 - \hat{x}_3 + \lambda_1 \nabla(v_2) \text{Sign}(v_2) \\ \dot{\hat{x}}_3 = \ddot{x}_2 + \lambda_2 \text{Sign}(v_3) \end{cases} \quad (7.18)$$

où  $\ddot{x}_2$  est l'accélération,  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$  et  $\tilde{x}_3$  sont respectivement les erreurs d'estimation de  $x_1$ ,  $x_2$  et  $\dot{x}_2$ .

En posant:  $v_1 = \tilde{x}_1 = \hat{x}_1 - x_1$ ,  $v_2 = \hat{x}_2 - \dot{\hat{x}}_1$ ,  $v_3 = \hat{x}_3 - \hat{x}_2$  et  $\nabla(v_1) = |v_1|^{2/3}$ ,  $\nabla(v_2) = |v_2|^{1/2}$ , on définit les fonctions *Sign* et  $\nabla()$  de la manière suivante:

$$\begin{cases} \nabla(v_1) = \text{diag}\{|v_{11}|^{2/3}, |v_{12}|^{2/3}, |v_{13}|^{2/3}, |v_{14}|^{2/3}, |v_{15}|^{2/3}\} \\ \nabla(v_2) = \text{diag}\{|v_{21}|^{1/2}, |v_{22}|^{1/2}, |v_{23}|^{1/2}, |v_{24}|^{1/2}, |v_{25}|^{1/2}\} \\ \text{Sign}(v_i) = [\text{sign}(v_{i1}), \text{sign}(v_{i2}), \text{sign}(v_{i3}), \text{sign}(v_{i4}), \text{sign}(v_{i5})]^T, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (7.19)$$

En choisissant la *i<sup>ème</sup>* composante de  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  telle que:  $\lambda_0^i = 3\sqrt[3]{f^+}$ ,  $\lambda_1^i = 1.5\sqrt{f^+}$ ,  $\lambda_2^i = 1.1f^+$ ,  $i = 1..5$ , les erreurs d'estimation  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$  et  $\tilde{x}_3$  convergent vers 0 en un temps fini  $t_0$ .

Dans ce cas, et à partir de l'équation (7.8), les déplacements verticaux des roues sont estimés en temps fini, puisque les accélérations verticales des roues  $\ddot{z}_{ri}$  sont mesurées en utilisant des accéléromètres:

$$\begin{cases} \hat{z}_{r1} = (-m_1\ddot{z}_{r1} + B_1\dot{\hat{q}}_1 + K_1\frac{T_w}{2}\sin(\hat{\phi}) \\ \quad + B_1\frac{T_w}{2}\cos(\hat{\phi})\dot{\hat{\phi}} + K_1\hat{q}_1 + k_1u_1)/k_1 \\ \hat{z}_{r2} = (-m_2\ddot{z}_{r2} + B_2\dot{\hat{q}}_2 - K_2\frac{T_w}{2}\sin(\hat{\phi}) \\ \quad - B_2\frac{T_w}{2}\cos(\hat{\phi})\dot{\hat{\phi}} + K_2\hat{q}_2 + k_2u_2)/k_2 \end{cases} \quad (7.20)$$

A partir de l'équation (7.10), la hauteur du centre de gravité  $\hat{z}$  est déduite comme suit:

$$\hat{z} = \frac{1}{2}(\hat{z}_{r1} + \hat{z}_{r2} + \hat{q}_1 + \hat{q}_2) + r_w \quad (7.21)$$

En utilisant (7.11), les forces verticales  $F_{ni}$  peuvent être estimées par:

$$\hat{F}_{ni} = F_{ci} + k_i(u_i - \hat{z}_{ri}), \quad i = 1, \dots, 4 \quad (7.22)$$

Finalement, le transfert de charge (LTR) qui indique le risque de renversement ou pas, est calculé par :

$$LTR = \frac{F_{nr} - F_{nl}}{F_{nr} + F_{nl}} \quad (7.23)$$

Pour valider les études théoriques et les algorithmes développés, une expérimentation a été réalisée à la Valbonne, sur le site de Renault Trucks, avec un véhicule instrumenté, comme montré sur la figure 7.17.



Figure 7.17: Le tracteur instrumenté

Le véhicule est équipé de plusieurs capteurs pour mesurer les dynamiques du véhicule qui sont:

- quatre capteurs LVDT sont installés pour mesurer les débattements de suspension du châssis,
- quatre accéléromètres pour la mesure des accélérations verticales des roues,
- un gyromètre tri-axial pour mesurer les vitesses de roulis, de tangage et de lacet,
- deux lasers pour mesurer la hauteur du châssis.

La figure 7.18 illustre les différents capteurs installés et utilisés. Alors que la figure 7.19 montre le positionnement des capteurs dans le véhicule. Différents tests et scénarios de conduite sont réalisés avec le véhicule instrumenté. Le test que nous présentons dans ce mémoire est celui de chicane ou zigzag, comme illustré sur la figure 7.20.

Ce test a été d'une grande importance pour bien comprendre et étudier le risque de renversement. En effet, le chauffeur sollicite fortement le véhicule en latéral pour provoquer un transfert de charge entre le côté droit et gauche du véhicule.

Sur la figure 7.21, les débattements de suspension avant gauche et droit du tracteur sont estimés et comparés aux mesures LVDT.

Nous remarquons que la convergence de l'observateur est rapide et l'estimation se fait en temps fini avec une erreur proche de 0. Aux temps critiques, 15s, 30s et 45s, l'effet du zigzag du véhicule est clairement montré. Le déplacement de la suspension avant droit diminue de sa valeur statique  $0.01m$  jusqu'à  $-0.03m$ , alors que celui de la suspension avant gauche augmente de  $0.01m$  pour atteindre  $0.025m$ .

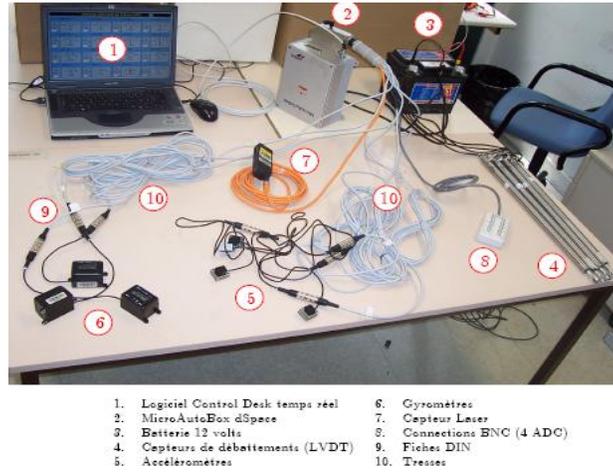


Figure 7.18: Les capteurs embarqués dans le véhicule

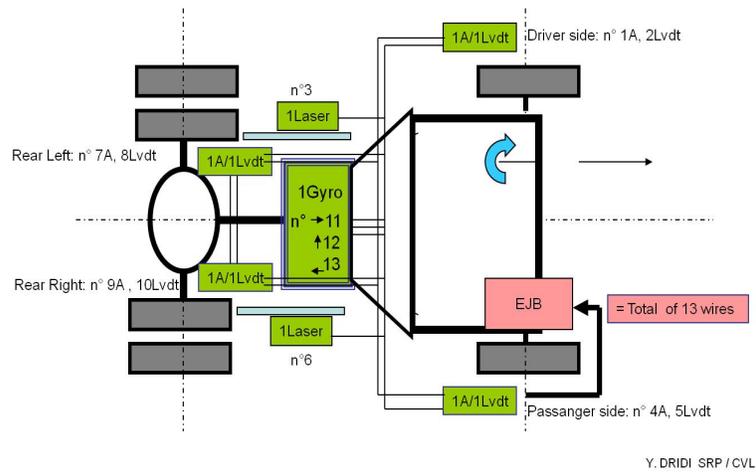


Figure 7.19: Positionnement des capteurs dans le véhicule



Figure 7.20: Test de chicane en situation réelle

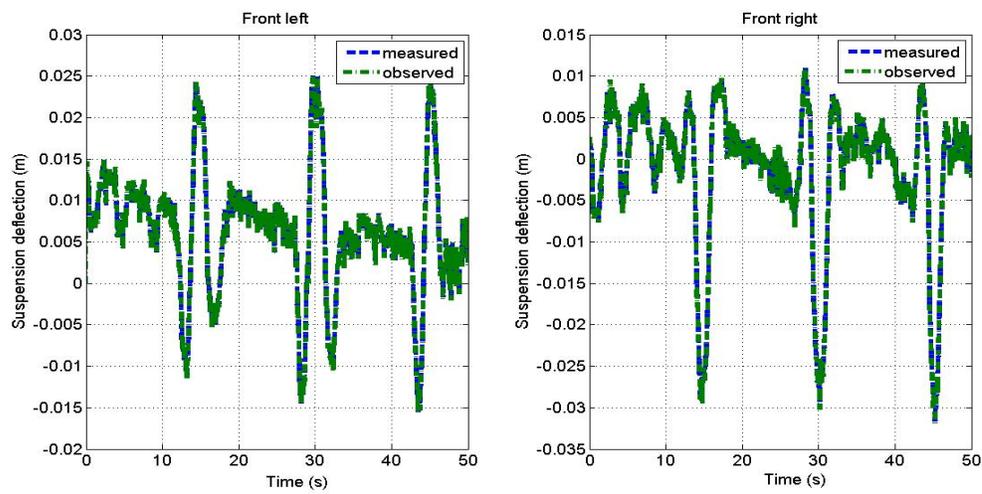


Figure 7.21: Estimation des débattements de suspension avant gauche et avant droit

La figure 7.22 montre l'estimation de la hauteur du centre de gravité.

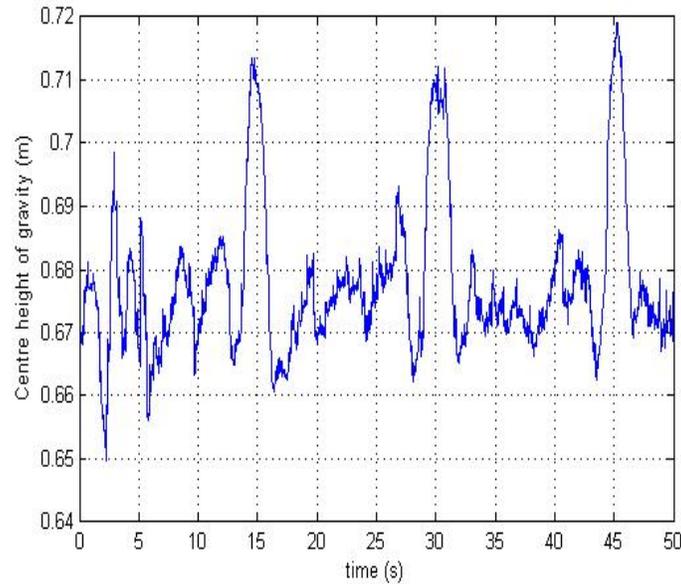


Figure 7.22: Estimation de la hauteur du centre de gravité

Comparée à la mesure de débattement de suspension avant gauche qui augmente à l'instant 15s pour atteindre 0.025m, au même moment l'estimation de la hauteur du centre de gravité augmente aussi pour atteindre 0.71m. Le même phénomène se reproduit à 30s et à 45s. Cette comparaison constitue un bon indicateur de la qualité de cette estimation.

Sur la figure 7.23, les forces verticales de l'essieu avant sont présentées et comparées aux mesures de débattements de suspension.

Nous notons qu'à 15s, 30s et à 45s, la force gauche augmente à 2800dN alors qu'aux mêmes moments, la force avant droite diminue pour atteindre 1900dN. Ceci est dû au fait du transfert de charge du côté droit vers le côté gauche du véhicule. On déduit aussi de cette comparaison que l'allure de ces estimations de forces est conforme à celle des mesures de débattement. En attendant de comparer cette estimation à la référence donnée par un capteur de forces, le résultat présenté ici nous renseigne sur la qualité de l'estimation. À partir des forces droite et gauche estimées, nous pouvons à présent calculer le LTR afin d'évaluer le transfert de charge, et de ce fait, le risque de renversement.

Le résultat est montré sur la figure 7.24. Nous remarquons, qu'aux instants 15s, 30s et 45s, apparaît un transfert de charge puisque le LTR passe de 0 à 0.2. Nous pouvons dire que dans ce cas, qu'aucun risque de renversement n'existe, puisque cette valeur n'atteint pas le seuil critique 1.

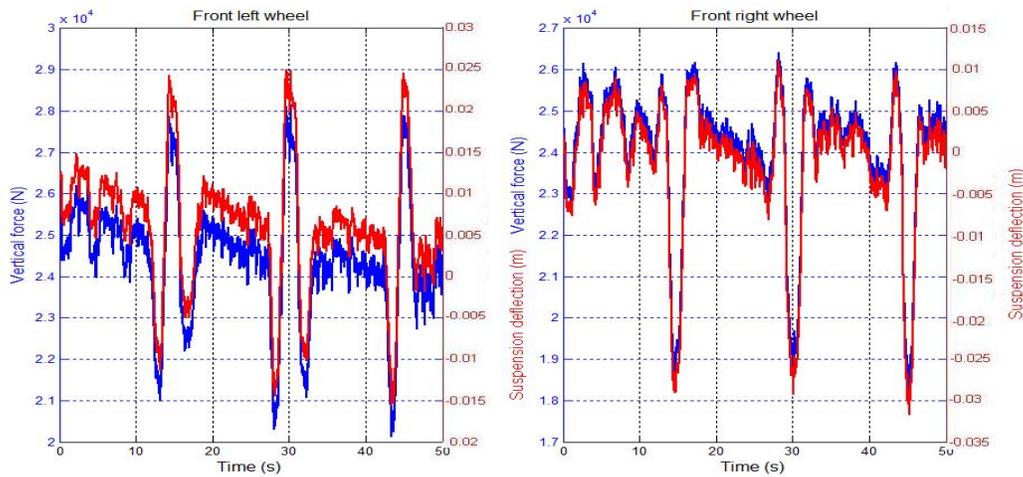


Figure 7.23: Estimation des forces verticales avant gauche et avant droite

Cependant, et afin de tester le dispositif de prédiction développé dans le cadre de ces travaux, nous avons baissé la valeur de ce seuil à 0.2 pendant les essais sur piste. Ce choix est dû au fait, que le tracteur instrumenté n'était pas équipé pendant les essais d'un dispositif de sécurité lui permettant d'atteindre la limite de sécurité sans se renverser et sans dommages.

D'après les résultats, nous avons remarqué que ce nouveau seuil de 0.2 a été atteint. Le risque est donc détecté et l'alarme est bien envoyée au chauffeur afin qu'il réduise sa vitesse.

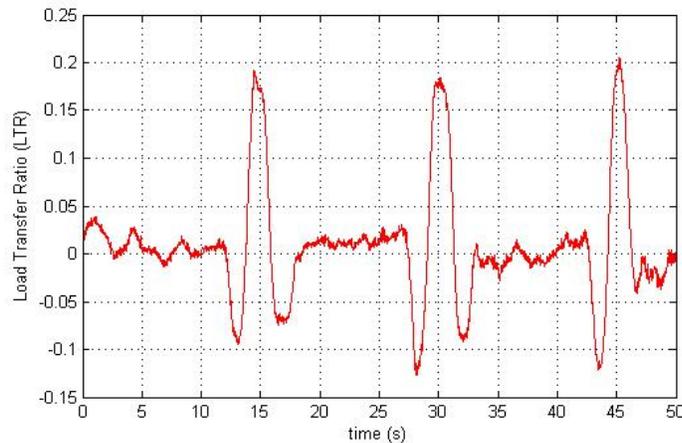


Figure 7.24: Transfert de charge à l'avant du tracteur

### 7.3.1.2 Approche probabiliste

Ce travail a été initié pendant la thèse de Yamine Sellami soutenue en novembre 2008 [Sel108]. Afin d’améliorer la prévention du risque, et alerter en un temps suffisamment précoce le conducteur, l’évaluation est fondée sur la prise en compte des incertitudes sur la dynamique du véhicule, sur le comportement du conducteur et sur les paramètres de l’infrastructure qui interviennent lors de la conduite. Ces incertitudes sont modélisées par des quantités aléatoires. La méthode utilisée est basée sur une approche fiabiliste pour déterminer la probabilité d’accident. L’intérêt de cette approche est l’estimation du risque par la prise en compte de l’incertain présent dans le système PL/Conducteur/Infrastructure et des aléas qui peuvent intervenir lors de la conduite. Les données incertaines internes au poids lourd qui sont les coordonnées des centres de gravité, les masses, les débattements des suspensions et des pneumatiques..etc, et celles de l’infrastructure qui sont les profils longitudinal et transversal de la route, le dévers, la pente, le rayon de courbure, adhérence,.. etc sont prises en compte dans l’évaluation des risques d’accident.

Les alertes données au conducteur, basées sur les résultats de cette évaluation, réduisent les sollicitations des systèmes de contrôle actif du véhicule, et aident le chauffeur à anticiper des situations critiques de manière à adapter ses réactions de façon progressive.

L’approche fiabiliste passe par le calcul des probabilités de défaillance du système PL/infrastructure, et nécessite des données statistiques sur les variables aléatoires du modèle sous-jacent. Or, ces données ne sont pas toujours disponibles. En outre, le calcul des probabilités devient plus complexe quand le nombre de variables aléatoires augmente, il est donc important de réduire leur nombre. Le choix doit se porter sur celles ayant les plus grandes variabilités et influence sur le risque. Ce choix est aidée par une étude de sensibilité du risque.

Le système déterministe présenté précédemment ne prend pas en compte les incertitudes sur les paramètres et les variables intervenant dans le calcul. Les valeurs de ces indicateurs sont entachées d’erreurs. Souvent, ces erreurs ne sont pas modélisées ou elles sont connues par des bornes extrêmes. Afin de compenser la perte d’exactitude au niveau de l’évaluation du risque, une marge de sécurité est introduite et ajoutée comme information supplémentaire au système de prévention. Dès que l’indicateur atteint cette marge, le système de contrôle ou d’alerte est activé. Par exemple, pour l’étude du renversement de poids lourd, nous avons introduit dans la section précédente l’indicateur LTR. La marge de sécurité du PL évaluée avec l’indicateur de renversement LTR est définie sur la plage  $-1$  à  $+1$ . Le fait d’avoir une incertitude sur cet indicateur, la valeur d’un LTR estimé à  $0,7$  peut avoir en réalité une valeur différente proche de sa valeur limite. Le fait de

considérer une marge de sécurité permet d'éviter ce problème d'incertitude. Le système de prévention s'active non pas sur le seuil limite de 1 mais à partir d'une valeur moindre qui sera définie par la marge de sécurité. De ce fait, le choix de cette marge se fait à partir d'un compromis entre la sécurité et le fonctionnement du poids lourd. En définissant une marge de sécurité plus large, on augmente sa sécurité en dépit de son fonctionnement. L'aspect fonctionnement décrit des conditions de conduite permettant au transporteur d'effectuer sa tâche de manière optimale (vitesse, contrainte de mobilité et consommation du carburant). Cependant l'étendue de cette marge est généralement déterminée par des tests pratiques ou à partir des valeurs limites des incertitudes paramétriques et de modélisation du système tout en ayant une limite acceptable de sécurité. La prise en compte des incertitudes du système et une modélisation adéquate de celles-ci sont donc importantes pour la prévention des accidents de poids lourds, surtout lorsqu'il s'agit d'une prévention basée sur la prédiction du risque. De ce fait, l'indicateur déterministe du risque est remplacé par la probabilité de dépassement d'un seuil critique de sécurité. Etant donné la complexité du modèle du PL, les non linéarités intervenant dans le calcul de l'indicateur probabiliste et les formes non gaussiennes des incertitudes, les simulations de Monte Carlo sont les plus adaptées au calcul de cette probabilité contrairement aux méthodes analytiques. Cependant, à cause des faibles valeurs de la probabilité du risque qui sont de l'ordre de  $10^{-6}$ , les méthodes de Monte Carlo trouvent leurs limites dans la conception des systèmes embarqués de prévention basés sur une approche probabiliste. En effet, la contrainte du temps réel ne peut être respectée avec les calculateurs actuels pour une estimation à base de simulations de Monte Carlo. Afin de palier ce problème, les méthodes de calcul de fiabilité sont introduites. La fiabilité d'un système s'exprime par la probabilité qu'il fonctionne correctement sans défaillance pendant une durée donnée et dans un environnement spécifié. La défaillance du système se produit suite à un dépassement d'une durée de vie nominale ou à l'occurrence d'évènements nuisibles.

La notion temporelle se distingue par exemple, par l'augmentation de la probabilité de défaillance en fonction du temps, due à la durée de vie du système [Gau02]. La probabilité de défaillance se calcule par le rapport entre le nombre de dispositifs défectueux sur le nombre total de dispositifs ([EP05], [Nel05], [Teb05], [Zwi05]). Le calcul fiabiliste est utilisé dans le but d'estimer la probabilité qu'un seuil critique de sécurité est dépassé. La méthode employée est celle utilisée dans la fiabilité des composants. Dans nos travaux, ce composant représente le système PL/conducteur/infrastructure, et la défaillance représente l'accident. Une seule limite de sécurité est traitée à la fois. Nous cherchons donc à définir un modèle empirique intégrant le calcul fiabiliste. Ce modèle indique si la situation de conduite passe

à un état dangereux, plus précisément si l'indice de fiabilité devient inférieur à un seuil de sécurité (voir figure 7.25).

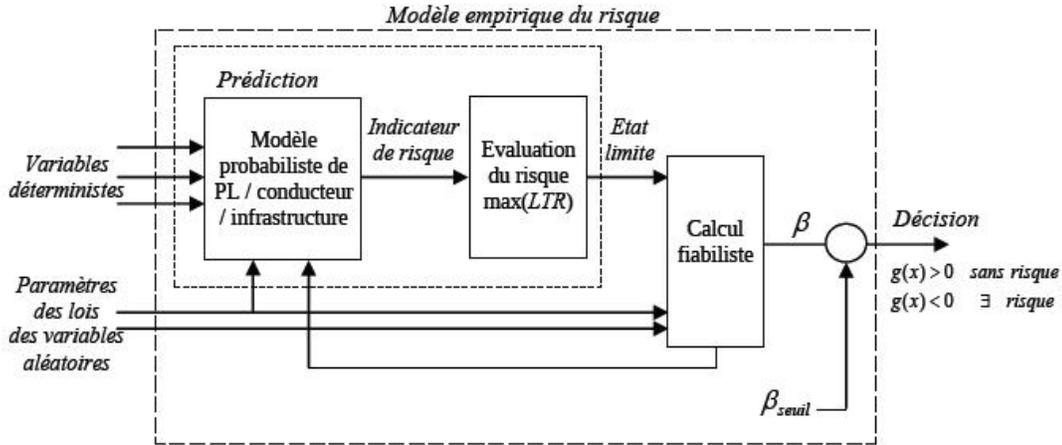


Figure 7.25: Schéma de conception du modèle empirique du risque

Afin de quantifier les risques, il est nécessaire d'établir les marges de sécurité, dites fonctions d'état limite, qui délimitent le domaine de bon fonctionnement du poids lourd (domaine de sécurité) et constituent la frontière du domaine de défaillance.

La fonction d'état limite  $g(x)$  doit vérifier les conditions suivantes :

$$\begin{aligned}
 g(x) = 0 & \text{ l'état limite} \\
 g(x) > 0 & \text{ le système est en fonctionnement normal} \\
 g(x) < 0 & \text{ le système est défaillant}
 \end{aligned}
 \tag{7.24}$$

où  $x$  est le vecteur des paramètres physiques.

Le calcul de fiabilité revient donc au problème de calcul de la probabilité de défaillance définie par :

$$P_f = P(g(X) < 0)
 \tag{7.25}$$

où  $X$  représente le vecteur des variables aléatoires intervenant dans la description de la fonction d'état limite. Cependant, la difficulté de calcul de probabilité augmente d'une manière exponentielle avec la dimension du vecteur aléatoire. Nous avons donc cherché à réduire le nombre de variables à probabiliser pour limiter les temps de calcul, en ne retenant que les variables les plus pertinentes qui ont une forte variabilité ou dont l'influence sur le résultat est importante. La discrimination de ces variables est réalisée par l'analyse de sensibilité que nous allons décrire ultérieurement.

En se basant sur la définition (7.25), la probabilité de défaillance peut être exprimée de deux manières. La première expression est déterminée par intégration sur le domaine de défaillance de la densité de probabilité conjointe du vecteur aléatoire :

$$P_f = \iint_{D_f} f_X(x) dx \quad (7.26)$$

avec  $dx$  un volume élémentaire de  $\mathbb{R}^n$ ,  $D_f = \{x \in \mathbb{R}^n / g(x) < 0\}$  est le domaine de défaillance,  $f_X$  est la densité de probabilité conjointe du vecteur aléatoire  $X$ .

La deuxième expression dépend de la densité de probabilité de la variable aléatoire  $Y = g(X)$  correspondante à la fonction d'état limite. Elle est donnée par :

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f_G(g(x)) ds \quad (7.27)$$

avec  $f_G$  la densité de probabilité de la variable aléatoire  $Y = g(X)$ .

Le problème d'intégration est réduit à une intégrale simple, mais la difficulté reste dans la caractérisation de la variable aléatoire  $g(X)$ . La figure 7.26 montre un exemple de calcul de la fiabilité du risque.

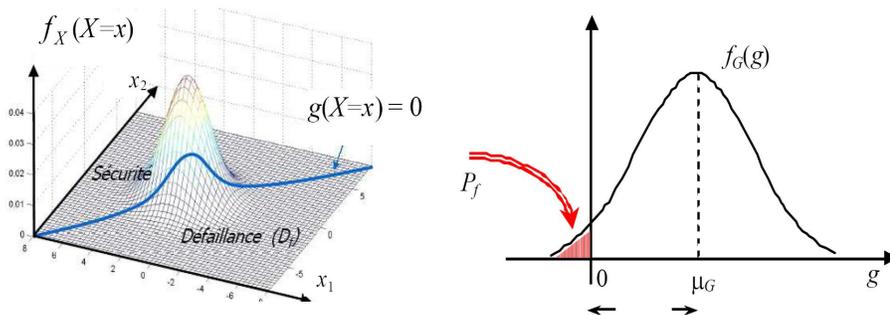


Figure 7.26: Exemple de calcul de fiabilité dans un espace aléatoire à deux dimensions

Afin d'éviter l'intégration et d'apporter des précisions sur le calcul de la probabilité de défaillance, plusieurs méthodes ont été développées et qui peuvent être classées en deux catégories, à savoir, les méthodes par simulation et les méthodes d'approximation.

**Méthodes par simulation** Les méthodes par simulation permettent d'estimer la probabilité de défaillance même dans le cas de lois de probabilité complexe, de dépendance entre variables ou de fonctions d'états limites non linéaires. Cependant, ces méthodes requièrent des temps de calcul qui peuvent être importants. Parmi ces méthodes, on

trouve la méthode de Monte-Carlo, la méthode Monte-Carlo conditionnelle avec ou sans estimation du point de défaillance le plus probable.

Le principe de simulation de Monte-Carlo consiste à réaliser des tirages selon la loi de probabilité conjointe du vecteur aléatoire et de compter le nombre de fois que le système se trouve dans le domaine de défaillance. La probabilité de défaillance peut être exprimée par la relation:

$$P_f \simeq \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I[g(x_i) \leq 0] \quad (7.28)$$

avec  $x_i$  la réalisation du  $i^{\text{ème}}$  tirage, et la fonction  $I[C]$  vaut “1” si la condition  $C$  est vérifiée et “0” sinon. L’évaluation de la probabilité de défaillance est exacte si le nombre de tirages est infini.

Afin d’améliorer la précision et de réduire le nombre de simulations, d’autres méthodes (de Monte-Carlo conditionnées) ont été développées sur la base de la méthode classique. Parmi ces méthodes, celle de tirages d’importance avec laquelle les simulations sont réalisées autour du point de défaillance le plus probable si ce dernier est connu par calcul ou estimation, et les méthodes basées sur l’exclusion ou la limitation de la zone de tirage. Ces méthodes sont aussi utilisées pour affiner les résultats obtenus par les méthodes d’approximation que nous détaillons dans ce qui suit.

**Méthodes d’approximation** Le calcul analytique de la fiabilité est le plus souvent irréalisable du fait de la complexité du système. Les méthodes d’approximation, appelées aussi méthodes directes reposent sur des simplifications de la fonction d’état limite et des lois de probabilités conjointes, afin d’obtenir des solutions analytiques approximatives et d’éviter l’intégration numérique [Lem05]. Ces méthodes se basent sur deux types de simplifications qui rendent les intégrales plus faciles à calculer. La première approximation consiste à transformer l’espace aléatoire physique en un espace normalisé où les variables aléatoires sont indépendantes, de moyennes nulles et de variances unités. Ceci permet d’exploiter les connaissances de manipulation des lois gaussiennes. L’approximation de la probabilité du risque, par une méthode d’approximation, passe par plusieurs étapes.

La première étape consiste à transformer le vecteur aléatoire physique  $X$  en un vecteur aléatoire gaussien centré et normé  $U : U = T(X)$ . Les transformations isoprobabilistes  $T$  les plus utilisées sont celles de Rosenblatt, Nataf, Paloheimo et Rackwitz-Fissler [Mel99]. L’hyper-surface d’état limite définie par  $g(x) = 0$  peut être exprimée dans le nouvel espace par  $H(u) = 0$ , où  $u$  est une réalisation de  $U$ , et  $U$  un vecteur de  $n$  variables aléatoires gaussiennes, centrées et normées.

La probabilité de défaillance est donnée par l'expression suivante :

$$P_{risk} = P(H(u) < 0) \quad (7.29)$$

La deuxième approximation se rapporte à la fonction d'état limite elle-même par des fonctions qui facilitent l'évaluation de la probabilité de défaillance.

La linéarisation de la fonction d'état limite conduit à remplacer l'hyper-surface d'état limite par un hyper-plan tangent au point de défaillance le plus probable. La méthode utilisant cette simplification est appelée FORM "First Order Reliability Method" [Lem05]. La probabilité de défaillance est alors calculée analytiquement après la transformation de l'espace physique en un espace normalisé de variables indépendantes, et la détermination du point d'état limite le plus probable.

Dans le cas d'une forte nonlinéarité de la fonction d'état limite, d'autres approximations ont été développées dans la littérature. Nous citons par exemple, l'approximation parabolique qui est la base de la méthode SORM "Second Order Reliability Method" [ZO01], comme montrée sur la figure 7.27.

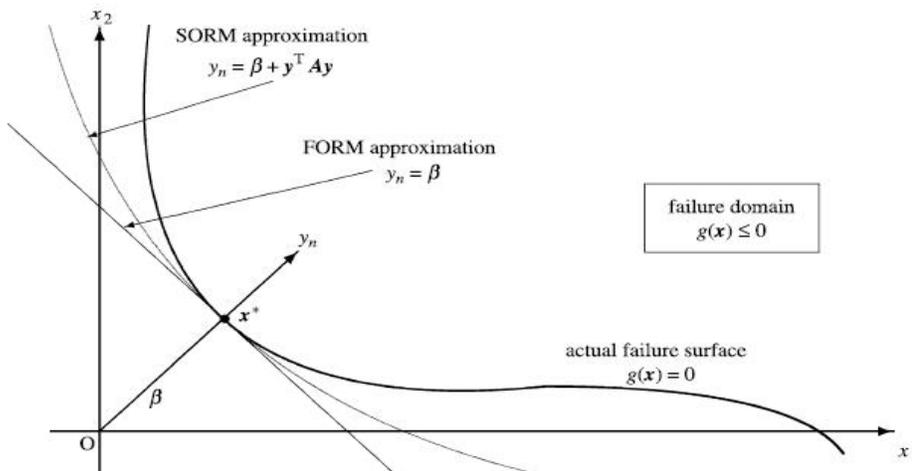


Figure 7.27: Etat limite et approximation de la probabilité de défaillance

Dans la théorie de la fiabilité, une autre variable indicatrice de fiabilité, dite indice de fiabilité, est introduite parallèlement à la probabilité de défaillance. L'indice apparaît comme le rapport entre la moyenne et l'écart type de la variable de marge  $g(X)$ .

Dans la seconde étape, on recherche, dans l'espace normalisé, le point  $P^*$  de l'hyper-surface d'état limite ayant la probabilité la plus élevée, et on calcule un indice de fiabilité  $\beta$  caractérisant une distance entre le système et la marge de sécurité.

Plusieurs représentations de l'indice de fiabilité ont été proposées dans la littérature, en commençant par l'indice de Rjanitzyne [Rja59] et l'indice de Cornell [BC70].

Hasofer et Lind [HL74] présente une définition complète de cet indice. Il correspond à la distance euclidienne entre l'origine de l'espace normalisé et la surface d'état limite, c'est-à-dire entre l'origine et le point  $P^*$ . L'indice est obtenu en résolvant le problème de minimisation suivant [SICH08]:

$$\beta = \min(\|u\|^2) \text{ sous les contraintes } H(u) = 0 \quad (7.30)$$

Dans la troisième étape, la probabilité du risque de renversement est estimée par une fonction de l'indice de fiabilité. Dans ce cadre, cette dernière relation dépend de la manière d'approximer l'état limite autour du point  $P^*$ . Dans la méthode FORM, la surface d'état limite est approximée par un hyper-plan tangent au point  $P^*$  à la surface  $H(u) = 0$ . Dans la méthode SORM, elle est approximée par une surface parabolique.

**Modélisation probabiliste du PL** Rappelons que le modèle déterministe d'un poids lourd à corps rigides est régi par une équation différentielle de la forme :

$$M(q)\ddot{q} + B(q, \dot{q}) + K(q) = F(q) \quad (7.31)$$

avec  $M$ ,  $B$ ,  $K$ , et  $F$  sont des matrices de dimensions appropriées, et  $q$  le vecteur de coordonnées généralisées.

Ce modèle déterministe du poids lourd va servir de base pour la conception d'un modèle probabiliste. En premier lieu, nous présentons un modèle probabiliste à paramètres aléatoires, où seules les incertitudes paramétriques sont modélisées. Puis en second lieu, les perturbations externes et les incertitudes de modélisation sont considérées.

**Prise en compte des incertitudes paramétriques** Si un ou plusieurs paramètres sont supposés aléatoires, le modèle probabiliste du poids lourd peut être alors écrit sous la forme :

$$M(Q, p)\ddot{q} + B(Q, \dot{Q}, p) + K(Q, p) = F(Q, p) \quad (7.32)$$

où  $M$ ,  $B$ ,  $K$ , et  $F$  sont des matrices aléatoires variables dans le temps,  $Q$  est le processus aléatoire correspondant au vecteur de configuration et  $p$  est le vecteur contenant l'ensemble des paramètres aléatoires.

Si à chaque résolution du modèle de poids lourd, le vecteur des paramètres est constant sur la période de prédiction, cette équation est dite équation différentielle à paramètres aléatoires. La résolution du système ne se repose que sur le modèle déterministe du PL/conducteur/infrastructure.

**Prise en compte des incertitudes de modélisation** La représentation des dynamiques négligées et/ou des excitations externes qui ne sont pas parfaitement modélisables par des modèles probabilistes peut conduire à écrire le système sous la forme d'un modèle stochastique hybride:

$$M(Q, p)\ddot{q} + B(Q, \dot{Q}, p) + K(Q, p) = F(Q, p) + G(Q)w(t) \quad (7.33)$$

avec  $w$  est le bruit de dynamique de l'état, et  $G$  une matrice dépendante de l'état.

Dans le cas où l'information sur la dynamique négligée n'est pas disponible, la matrice  $G$  est généralement considérée constante. Si en plus, le bruit d'état est un bruit blanc gaussien normé, cette matrice correspondra à la matrice de covariance des bruits. L'expression de cette matrice en fonction de l'état et des paramètres peut être obtenue statistiquement par des données expérimentales, et/ou en réduisant un modèle plus complet du poids lourd.

**Etude de sensibilité** Cette partie est consacrée à l'étude de sensibilité du risque de renversement de poids lourd par rapport aux variations et incertitudes paramétriques du système conducteur/PL/ infrastructure. Les paramètres à considérer comme variables aléatoires seront ceux qui ont le plus d'influence sur le risque [SIB<sup>+</sup>08a].

Dans l'analyse de sensibilité, un seul paramètre est varié à la fois pour chaque simulation. Le risque est évalué soit par les valeurs de  $LTR$  correspondant au régime établi, soit par les valeurs maximales du  $LTR$  sur tout l'intervalle de simulation.

La sensibilité du  $LTR$  par rapport au vecteur  $p$  des paramètres est donnée par :

$$S = \frac{\partial LTR}{\partial p} \quad (7.34)$$

La sensibilité est calculée numériquement et suppose que les éléments du vecteur  $p$  sont indépendants.

Les paramètres pris en compte dans notre cas sont donnés par le tableau de la figure 7.28.

	Paramètres	Description
Entrées du modèle PL	v	Vitesse initiale
	$\delta$	Angle de braquage
Paramètres du PL	HCDG	Hauteur du CG
	Mns1, Mns2	Masse non suspendue des trains 1 et 2
	MTotale	Masse totale du PL
	L1 ou X	Distance CG – essieu 1
	Y	Position latérale du CG
	Kr1, Kr2	Raideurs des ressorts des essieux 1 et 2
	Kam1, Kam2	Raideurs des amortisseurs des essieux 1 et 2
	Kb1, Kb2	Raideurs des barres anti-roulis des essieux
Interaction Pneus/Chaussée	Kp1, Kp2	Raideurs des pneumatiques des essieux 1 et 2
	Adhx1, Adhx2	Adhérences longitudinales
	Adhy1, Adhy2	Adhérences latérales
	$\mu$	Coefficient de frottement de la chaussée
Infrastructure	Pente, Dévers	Pente et dévers de la chaussée

Figure 7.28: Les variables considérées dans l'étude de sensibilité

Dans cette analyse, des simulations sont effectuées pour des coefficients de variation des paramètres de  $\pm 5\%$  et  $\pm 10\%$ , en considérant que le coefficient de variation d'un paramètre  $p_i$  est donné par  $\frac{\Delta p_i}{p_i}$ .

Ce travail a permis de trouver les paramètres les plus influents, qui sont, selon la figure 7.29, les paramètres d'entrée, qui sont la vitesse et l'angle de braquage, la hauteur et la position longitudinale du centre de gravité et la masse totale. Les raideurs de la barre anti-roulis, de suspension et pneumatique sont moins influentes, de même pour l'adhérence.

**Application à l'évaluation du risque de renversement du PL** L'évaluation du risque de renversement est basée sur le calcul du rapport de transfert de charge *LTR*. Ce dernier estime le rapport des forces normales agissant sur les deux côtés gauche et droit du véhicule. Afin d'avoir une seule évaluation du risque, on définit un rapport de transfert global pour le véhicule. Ce dernier peut être défini par la moyenne des  $LTR_i$  relatifs à chaque essieu  $i$  ou par le maximum des *LTR* des essieux. Dans notre cas, ce rapport est défini par la résultante des forces d'impact appliquées sur les parties droite et gauche du véhicule. Lorsque le véhicule à charges équitablement réparties est en ligne droite, il aura des dynamiques stables en roulis, et le *LTR* prendra de faibles valeurs.

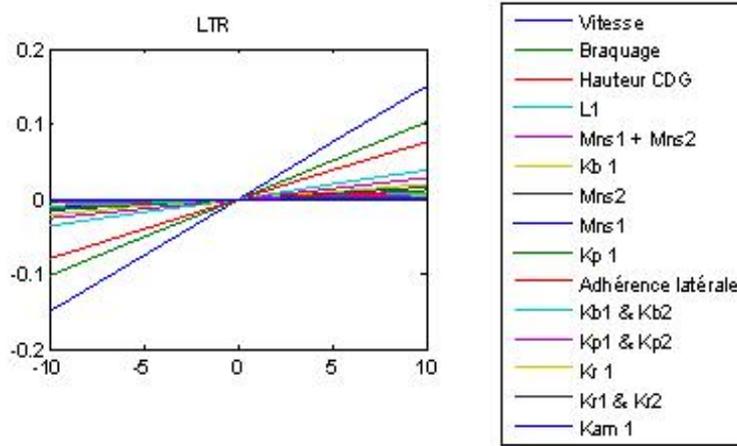


Figure 7.29: Coefficient de variation du LTR (en %) en fonction des coefficients de variation des paramètres

Le risque devient plus élevé lorsque cet indicateur tend vers  $\pm 1$ . Ces deux valeurs extrêmes caractérisent le décollement des roues. Le *LTR* donne alors une condition nécessaire mais pas suffisante pour que le renversement se produise.

Le *LTR* se trouve entre deux valeurs seuils:

$$-R_{seuil} < LTR < R_{seuil} \quad (7.35)$$

avec  $R_{seuil}$  un seuil de sécurité donné au *LTR*.

La probabilité du risque est alors définie par :

$$P_{risk} = P(|LTR| > R_{seuil}) \quad (7.36)$$

Ici,  $R_{seuil}$  est choisi dans l'intervalle  $]0 \ 1]$  selon le niveau de sécurité désiré. Plus de détails peuvent être trouvés dans ([Sel08], [SI08], [SIB+08b]).

### 7.3.2 Identification des incertitudes

Lors des étapes de modélisation et d'estimation des états dynamiques du système, nous avons considéré que les paramètres du modèle sont bien connus et invariant dans le temps. Cependant, il s'avère en réalité que c'est très difficile d'avoir les valeurs de ces paramètres avec certitude, ce qui peut donc fausser la qualité de la modélisation et par conséquent de l'estimation. Ceci sans parler des bruits de mesures qui viennent se rajouter pour perturber les résultats. Nous nous sommes donc intéressés à développer la thématique de

l'identification et appliquer les théories existantes à nos différentes applications ([SS89], [FPLL01]). Un observateur d'ordre 2 est donc utilisé pour identifier quelques paramètres du modèle ainsi que les perturbations qui sont dans notre cas représentées par les entrées inconnues qui sont les forces d'impact.

En effet la convergence en temps fini de cet observateur rend possible cette identification. Pour mieux illustrer ces propos, nous avons utilisé cet approche pour identifier les raideurs de suspension ainsi que les masses non suspendue.

Prenons l'exemple d'un modèle d'un demi tracteur suivant:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + F_g(x_1, u) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7.37)$$

où  $x_1 = [q_1 \ q_2 \ \phi]$  est le vecteur d'état composé respectivement des débattements de suspension droit et gauche ainsi que de l'angle de roulis,  $x_2$  représente sa vitesse,  $f$  est composé des nonlinéarités du système et  $F_g = [-F_{g1} \ -F_{g2} \ 0]^T = [-\frac{F_{Z1}}{m_1} \ -\frac{F_{Z2}}{m_2} \ 0]^T$ , avec  $F_{Z1}$  et  $F_{Z2}$  sont respectivement les forces d'impact droite et gauche,  $m_1$  et  $m_2$  étant respectivement les masses des roues droite et gauche.

Pour pouvoir identifier les perturbations et les paramètres, réécrivons le système d'équation 7.37 par:

$$\begin{cases} \dot{x}_{11} = x_{21} \\ \dot{x}_{21} = a_1 \varphi_1(x_{11}) - F_{g1} \\ \dot{x}_{12} = x_{22} \\ \dot{x}_{22} = a_2 \varphi_2(x_{12}) - F_{g2} \end{cases} \quad (7.38)$$

où  $x_{11} = q_1$ ,  $x_{21} = \dot{q}_1$ ,  $x_{12} = q_2$ ,  $x_{22} = \dot{q}_2$ .

Les vecteurs des paramètres inconnues sont donnés par  $a_1$  et  $a_2$  tels que:  $a_1 = [k_1(\frac{m_1-m}{m_1}) \ k_2]$ ,  $a_2 = [k_1 \ k_2(\frac{m-m_2}{m_2})]$ ,  $\varphi_1 = \frac{q_1}{m}$  et  $\varphi_2 = \frac{q_2}{m}$ .

où  $m$  représente la masse non suspendue du véhicule.

En posant  $(x_1, x_2) = (x_{11}, x_{21})$  ou  $(x_1, x_2) = (x_{12}, x_{22})$ ,  $\varphi = \varphi_1$  ou  $\varphi = \varphi_2$  et  $a = a_1$  ou  $a = a_2$ , nous proposons l'observateur suivant basé sur les modes glissants ([EKL86], [DFP06]) :

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + \lambda |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sign}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \bar{a} \varphi(\hat{x}_1, \hat{x}_2) + \alpha \text{sign}(\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (7.39)$$

où  $\hat{x}_1$  et  $\hat{x}_2$  sont les estimées respectivement de  $x_1$  et  $x_2$  et  $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1 \in \mathfrak{R}$  est l'erreur d'estimation, la variable  $\bar{a}$  représente le vecteur des valeurs nominales des paramètres.

L'erreur dynamique d'estimation est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - \lambda |\tilde{x}_1|^{1/2} \text{sign}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = \tilde{a} \varphi(x_1, \tilde{x}_2) + \zeta - \alpha \text{sign}(\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (7.40)$$

avec  $\tilde{a} = a - \bar{a}$  est l'erreur d'estimation du vecteur de paramètre  $a$ ,  $\zeta = -F_{g1}(x_1, u)$  ou  $\zeta = -F_{g2}(x_1, u)$  et  $\tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2$ .

Après convergence de l'observateur 7.39 sous certaines conditions sur les gains de l'observateur  $\lambda$  et  $\alpha$  tels que décrit dans [DFP06], l'erreur  $\tilde{x}_2$  tend vers 0 en un temps fini  $t_0$ . Dans ce cas et d'après 7.40, nous obtenons:

$$\alpha \text{sign}(\tilde{x}_1) = \tilde{a} \varphi(x_1, \tilde{x}_2) + \zeta \quad (7.41)$$

### 7.3.2.1 Identification des perturbations

Afin d'identifier les perturbations, nous considérons que les paramètres sont totalement connus, c'est à dire que  $\tilde{a} = 0$ . Dans ce cas et d'après 7.41 la perturbation  $\zeta$  est calculée de la manière suivante:

$$\zeta = \alpha \text{sign}(\tilde{x}_1) \quad (7.42)$$

### 7.3.2.2 Identification des paramètres

Afin d'identifier les paramètres et dans le cas où  $\zeta = 0$ , nous avons d'après 7.41:

$$\tilde{a} \varphi(x_1, \tilde{x}_2) = \alpha \text{sign}(\tilde{x}_1) \quad (7.43)$$

Ainsi, le vecteur d'erreur d'estimation des paramètres  $\tilde{a}$  est obtenu par une régression linéaire comme décrit dans ([IK11], [IFSD11], [Imi11], [IFS12]).

### 7.3.3 Contrôle actif

Contrairement à ce qu'on a vu précédemment, les méthodes développées se basent uniquement sur l'estimation et la prédiction du risque. Ces méthodes alertent le chauffeur sur la dangerosité du risque sans intervenir directement sur le changement de son comportement. La recherche que je développée ici, consiste à développer un système capable d'agir sur l'angle de braquage ou sur les pédales de freins afin de changer le comportement du conducteur et éviter l'accident ([LCC96], [AOB99], [OBA99], [Mam99], [WT99], [SC03], [RCJH05], [SVS+10]).

Deux systèmes de contrôle sont développés afin d'éviter le renversement et la sortie de voie des PL. Ils sont basés sur l'algorithme du super twisting ([Hau83], [Lev98], [BF05]).

L'avantage de cet algorithm est qu'il assure la convergence en temps fini, tout en évitant les chattering. Les trajectoires oscillent donc autour de zero comme montrées sur la figure 7.30.

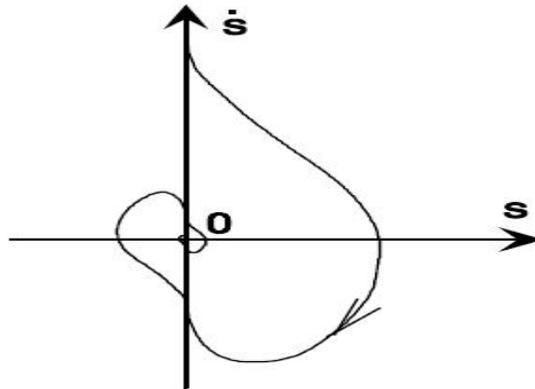


Figure 7.30: Trajectoires du super twisting algorithme

En plus de l'angle de braquage commandé par le chauffeur  $\delta_c$ , une autre entrée de commande est donnée par un actionneur  $\delta_a$ . Dans ce cas, l'entrée du système devient  $u = \delta = \delta_c + \delta_a$ .

Le schéma bloc du système de contrôle proposé est représenté sur la figure 7.31.

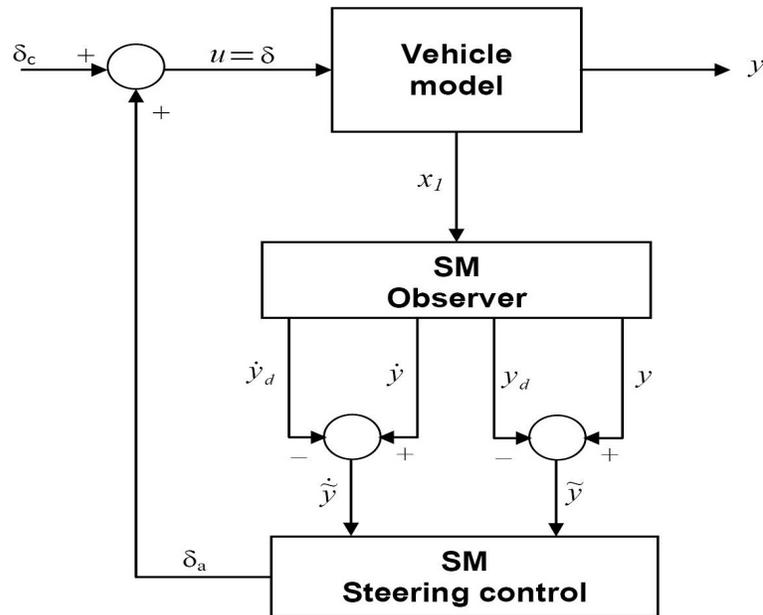


Figure 7.31: Diagramme de contrôle

Afin de mieux montrer l'approche, prenons l'exemple d'un tracteur à deux essieux que nous avons ramené à un seul essieu comme montré sur la figure 7.32.

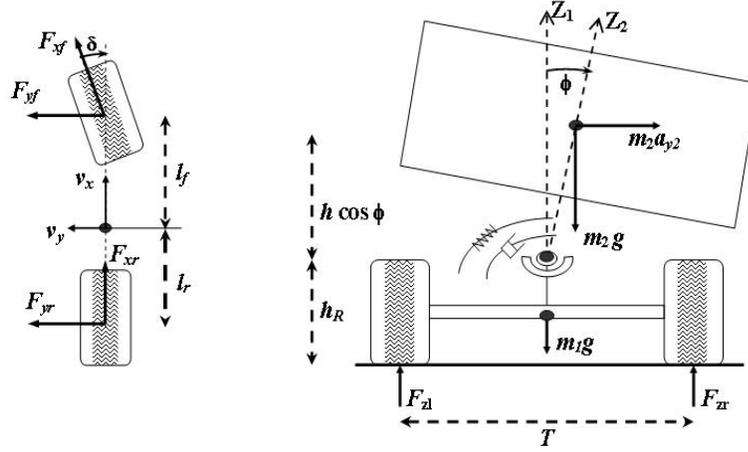


Figure 7.32: Vue latérale du modèle du PL

A vitesse constante, les forces latérales peuvent être approximées en fonction des angles de dérive des pneumatiques respectivement à l'avant et à l'arrière  $\alpha_f$  et  $\alpha_r$ , du coefficient d'adhérence  $\mu$  ainsi que des raideurs de dérive des pneumatiques  $c_f$  et  $c_r$  :

$$\begin{cases} F_{yf} = c_f * \alpha_f \\ F_{yr} = c_r * \alpha_r \end{cases} \quad (7.44)$$

Les angles de dérive  $\alpha_f$  et  $\alpha_r$  sont fonction de l'angle de braquage  $\delta$ , de  $\beta$  représentant la direction du vecteur vitesse, de la vitesse du véhicule  $v$ , ainsi que de la vitesse de lacet  $\dot{\psi}$  ([BPL89], [Pac89]).

Ces angles sont calculés de la manière suivante:

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta - \beta - \dot{\psi} l_f / v \\ \alpha_r = -\beta + \dot{\psi} l_r / v \end{cases} \quad (7.45)$$

Sous forme d'état, ce modèle peut être écrit de la manière suivante:

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (7.46)$$

où  $u$  est l'entrée de commande et  $x = [y \ \phi \ \psi \ \beta \ \dot{y} \ \dot{\phi} \ \dot{\psi}]^T$  représente le vecteur d'état composé respectivement du déplacement latéral, angle de roulis, angle de lacet, angle de direction, vitesse latérale, vitesse de roulis et vitesse de lacet. Les matrices  $A$  et  $B$  sont composés des paramètres dynamiques du véhicule:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 & a_{47} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 & a_{57} \\ 0 & a_{62} & 0 & 0 & 0 & a_{66} & a_{67} \\ 0 & 0 & 0 & a_{74} & 0 & 0 & a_{77} \end{bmatrix}; B = [ 0 \ 0 \ 0 \ b_4 \ b_5 \ 0 \ b_7 ]^T$$

$$a_{44} = \frac{c_f + c_r}{mv}; a_{47} = \frac{(-c_f l_f + c_r l_r) - mv^2}{mv^2}; a_{55} = -\frac{(c_f + c_r)}{mv}; a_{57} = \frac{(-c_f l_f + c_r l_r) - mv^2}{mv};$$

$$a_{62} = -\frac{(K_r - m_2 gh)}{I}; a_{66} = -\frac{B_r}{I}; a_{74} = \frac{(-c_f l_f + c_r l_r)}{J_z}; a_{77} = -\frac{(c_f l_f^2 + c_r l_r^2)}{J_z v}; b_4 = \frac{c_f}{mv}; b_5 = \frac{c_r}{mv}; b_7 = \frac{l_f c_f}{J_z}$$

avec  $I = J_x + h^2 m_2$ ,  $m_2$  représente la masse suspendue et  $m_1$  la masse non suspendue,  $T$  est la largeur de la voie,  $F_{zl}$  et  $F_{zr}$  représentent respectivement la force verticale gauche et droite,  $m$  est la masse totale du véhicule,  $J_z$  est l'inertie selon l'axe  $Z$ ,  $J_x$  est l'inertie selon l'axe  $X$ ,  $h_R$  est la distance entre l'axe de roulis et le sol,  $K_r$  est le coefficient de raideur et  $B_r$  est l'amortissement.

### 7.3.3.1 Renversement

L'idée est de mettre en oeuvre une méthode de contrôle actif qui permet de stabiliser les transferts de charge dans le poids lourd. La stabilisation se fait en minimisant les variations des forces d'impact dynamiques, i.e., en stabilisant les forces d'impact autour de la valeur statique qui est le poids du véhicule à l'arrêt. Il s'agit de définir l'actionneur à utiliser pour réaliser la stabilisation des forces. Les trois principales méthodes sont : l'utilisation des couples moteurs et de freinage, l'utilisation du volant et donc l'asservissement par braquage actif et enfin l'utilisation du système de suspension. Ces travaux sont en partie inspirés de ceux cités dans ([AO99], [OBA99], [LEG03], [Mi03], [SC03], [GSB06], [TZZ+07]), tout en utilisant des méthodes de contrôle plus robustes telles que celles basées sur le super twisting algorithme couplés à des estimateurs/observateurs afin d'éviter de recourir à l'utilisation de plusieurs capteurs.

Le critère de renversement est basé sur le LTR (Load Transer Ratio) calculé de la façon suivante:

$$LTR = R = \frac{F_R - F_L}{F_R + F_L} \tag{7.47}$$

$$\frac{2m_2}{mT} \left( (h_R + h \cos \phi) \frac{a_y 2}{g} + h \sin \phi \right)$$

où  $a_{y2}$  est l'accélération latérale de la masse suspendue.

En supposant que  $m_1 \ll m_2$  et que  $h \sin \phi \ll (h_R + h \cos \phi) \frac{a_{y2}}{g}$ , ce coefficient  $R$  peut être approximé de la manière suivante:

$$R = \frac{2(h + h_R) a_{y2}}{T g} \quad (7.48)$$

Le but du système de contrôle est d'assurer la convergence de l'accélération latérale  $a_{y2}$  vers l'accélération limite  $a_{y \text{ lim}}$ . Cette dernière est obtenue à partir de l'équation 7.48:

$$a_{y \text{ lim}} = \frac{0.9gT}{2(h + h_R)} \quad (7.49)$$

Ceci permettra donc de limiter le transfert de charge entre la roue gauche et droite du véhicule à sa valeur maximale 0.9.

Nous choisissons la surface de glissement suivante:

$$S = \dot{\tilde{y}} + \lambda \tilde{y} \quad (7.50)$$

où  $\tilde{y} = y - y_d$  et  $\dot{\tilde{y}} = \dot{y} - \dot{y}_d$  sont respectivement l'erreur sur le déplacement latérale et l'erreur sur la vitesse latérale,  $\lambda$  est une constante positive,  $y_d$  et  $\dot{y}_d$  sont respectivement le déplacement latéral désiré et la vitesse latérale désirée obtenues respectivement par une double et une simple intégration de l'accélération latérale limite précédemment calculée.

En dérivant la variable  $S$ , nous obtenons:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \ddot{\tilde{y}} + \lambda \dot{\tilde{y}} \\ &= \frac{c_f}{m} u + (\lambda + a_{55}) \dot{\tilde{y}} + a_{57} \dot{\tilde{\psi}} \end{aligned} \quad (7.51)$$

où  $\dot{\tilde{\psi}}$  est l'erreur d'estimation de la vitesse de lacet.

Le vecteur de contrôle équivalent  $u_{eq}$  est obtenu en résolvant l'équation  $\dot{S} = 0$  :

$$u_{eq} = -\frac{m}{c_f} ((\lambda + a_{55}) \dot{\tilde{y}} + a_{57} \dot{\tilde{\psi}}) - \delta_c \quad (7.52)$$

La loi de contrôle proposée est donc la suivante:

$$\begin{cases} \delta_a = u_{eq} - k_1 |S|^{1/2} \text{sign}(S) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -k_2 \text{sign}(S) \end{cases} \quad (7.53)$$

où  $k_1$  et  $k_2$  sont les gains positifs du contrôleur. La Preuve et l'analyse de convergence du super twisting algorithm peuvent être trouvées dans ([Hau83], [Lev98], [BF05]).

Ce travail a fait l'objet d'une publication au congrès international sur les poids lourds HVTT en 2010 en Australie [IMB10], une autre à IAVSD, International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks [Imi11] et une revue acceptée pour publication à IEEE Transactions on Vehicular Technology [IFM11b].

### 7.3.3.2 Sortie de voie

La sortie de voie se produit dans le cas où le véhicule perd de l'adhérence à cause du mauvais état de la chaussée ou bien à cause d'une vitesse excessive lors de prise de virage à forte courbure. On trouve dans la littérature plusieurs travaux traitant de cette problématique ([Mam99], [TTWH99], [WT99], [HB02], [DIDW03]).

Les travaux réalisés dans mes recherches dans ce domaine, consistent à améliorer les systèmes existant, en rajoutant notamment l'estimation robuste des états du véhicule au système de contrôle ou encore identifier ses paramètres dynamiques telles que les masses ou les raideurs de suspensions.

Le système de contrôle ainsi étudié et qui est toujours en cours d'amélioration est basé sur l'utilisation d'un contrôleur robuste basé sur l'algorithme du super twisting [IM11].

Il est basé sur le contrôle de la position et de la vitesse latérale du PL. Ce système permet de maintenir le véhicule au centre de la voie en supposant que la distance entre le centre et le bord de voie est mesurée.

Les erreurs respectivement sur le déplacement latéral  $\tilde{y}$  et sur l'angle de lacet  $\tilde{\psi}$  peuvent être calculées de la manière suivante:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{y}} = v\beta + l_d\dot{\psi} + v\tilde{\psi} \\ \dot{\tilde{\psi}} = \dot{\psi} - v\rho \end{cases} \quad (7.54)$$

où  $\rho$  est la courbure de la route et  $l_d$  est la distance de visée.

Le but du contrôleur est d'assurer la convergence vers 0 de la variable  $y_e = \tilde{y} + \tilde{\psi}$ .

Dans ce cas et en utilisant le même principe que précédemment, le vecteur de contrôle équivalent est donné par:

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \ddot{y}_e + \lambda\dot{y}_e = 0 \\ \implies u_{eq} &= \frac{-(\lambda + a_{55})\dot{\tilde{y}} - (\lambda + a_{77} + a_{57})\dot{\tilde{\psi}} - a_{74}\beta}{\Gamma} \end{aligned} \quad (7.55)$$

Ce travail a fait l'objet d'une publication à la revue International Journal of Robust and Nonlinear control [IM11] et à la conférence ICCA'11 [IMF11].

## 7.4 Caractérisation de l'infrastructure et impact sur la sécurité routière des PL

Cette thématique traite de l'estimation des caractéristiques de l'infrastructure et étude de leurs influences sur la sécurité des PL. En effet, ces caractéristiques ne sont toujours pas bien mesurées ou elles ne le sont pas en temps réel. Ce qui représente un handicap pour le développement de systèmes embarqués d'aides à la conduite.

Dans nos recherches, nous nous sommes intéressés à l'estimation de l'adhérence ainsi que le profil longitudinal de la route. C'est ce dernier point que nous détaillons dans ce paragraphe en donnant le principe de la méthode ainsi que quelques résultats expérimentaux.

Quelques méthodes permettant d'avoir le profil de route existent, à savoir, la mesure par l'analyseur de profil en long (APL) ou bien par le GMR Road Profilometer, dite méthode inertielle ([SK64], [LDG96]).

L'APL représenté en figure 7.33 est un appareil de mesure, développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à la fin des années 1960, qui permet de relever un profil en long de route dans la bande de l'uni. L'APL est considéré comme un appareil très fiable. Il a été l'objet de plusieurs essais où ses performances ne sont plus à prouver. Ce dernier est considéré comme référence dans la validation des profils estimés par l'approche qu'on propose ([Imi03], [Imi10a], [Imi10b]).



Figure 7.33: APL: Analyseur de Profil en Long

Basée sur les observateurs à modes glissants, la méthode développée permet d'estimer les paramètres d'infrastructures en temps réel. Pour comprendre la démarche, un exemple

d'estimation du profil de la route est montré ici.

Soit un système sous forme d'état et représentant un modèle de demi tracteur :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \ddot{q} = M^{-1}(F_g - C(x_1, x_2)x_2 - K(x_1)) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (7.56)$$

où  $q = [q_1, q_2, \phi]^T$  est le vecteur des coordonnées généralisées,  $x = (x_1, x_2)^T = (q, \dot{q})^T \in \mathfrak{R}^6$  est le vecteur d'état et  $y = q \in \mathfrak{R}^3$  est le vecteur mesures.

Avant de développer l'observateur, quelques suppositions sont faites:

1. l'état est borné ( $\|x(t)\| < \infty, \forall t \geq 0$ ).
2. le système est à entrées bornées ( $\exists$  une constante  $\mu \in \mathfrak{R}$  telle que:  $|u_i| < \mu, i = 1..2$ ).
3. les forces généralisées  $F_g$  sont bornées ( $\exists$  a constante  $\zeta \in \mathfrak{R}$  telle que:  $F_{gi} < \zeta, i = 1..3$ ).

Afin d'observer le vecteur  $x$  et de déduire les entrées inconnues, l'observateur à modes glissants d'ordre 2 est appliqué:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + z_1 \\ \dot{\hat{x}}_2 = M^{-1}(F_g - C(\hat{x}_1, \hat{x}_2)\hat{x}_2 - K(\hat{x}_1)) + z_2 \end{cases} \quad (7.57)$$

où  $\hat{x}_1$  et  $\hat{x}_2$  sont les estimées respectivement de  $x_1$  et  $x_2$ .

Les gains  $z_1$  et  $z_2$  sont calculés de la manière suivante:

$$\begin{cases} z_1 = \lambda \nabla(\tilde{x}_1) \text{Sign}(\tilde{x}_1) \\ z_2 = \alpha \text{Sign}(\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (7.58)$$

où  $\tilde{x}_1 = x_1 - \hat{x}_1 \in \mathfrak{R}^3$  est le vecteur d'erreur d'estimation.

Les matrices de gains ( $\lambda$  et  $\alpha$ )  $\in \mathfrak{R}^{3 \times 3}$  et  $\nabla(\tilde{x}_1)$  ainsi que la valeur de "Sign" sont définies de la même manière suivante:

$$\begin{cases} \lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3\} \\ \alpha = \text{diag}\{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\} \\ \nabla(\tilde{x}_1) = \text{diag}\{|\tilde{x}_{11}|^{1/2}, |\tilde{x}_{12}|^{1/2}, |\tilde{x}_{13}|^{1/2}\} \\ \text{Sign}(\tilde{x}_1) = \text{diag}[\text{sign}(\tilde{x}_{11}), \text{sign}(\tilde{x}_{12}), \text{sign}(\tilde{x}_{13})]^T \end{cases} \quad (7.59)$$

L'erreur dynamique d'estimation est:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}}_1 = \tilde{x}_2 - \lambda \nabla(\tilde{x}_1) \text{Sign}(\tilde{x}_1) \\ \dot{\tilde{x}}_2 = M^{-1}\hat{F}_g - M^{-1}(C(x_1, x_2)x_2 - C(\hat{x}_1, \hat{x}_2)\hat{x}_2) \\ -M^{-1}(K(x_1) - K(\hat{x}_1)) - \alpha \text{Sign}(\tilde{x}_1) \end{cases} \quad (7.60)$$

Puisque les accélérations du système sont bornées, alors les éléments de la matrice  $\alpha$  peuvent être minorés par:

$$\alpha_i > 2 \max(\dot{\tilde{x}}_{2i}), \quad i = 1..3 \quad (7.61)$$

D'un autre côté, et d'après [DFP06], les éléments de la matrice  $\lambda$  sont calculés par :

$$\lambda_i > \sqrt[2]{\frac{2}{\alpha_i - 2 \max(\dot{\tilde{x}}_{2i})} \frac{(\alpha_i + 2 \max(\dot{\tilde{x}}_{2i}))(1 + p_i)}{1 - p_i}}, \quad i = 1..3 \quad (7.62)$$

où  $p_i \in ]0, 1[$  sont des constantes à choisir (voir [DF05]).

Afin d'étudier la stabilité de l'observateur, nous assurons d'abord, de la convergence de  $\tilde{x}_1$  et  $\dot{\tilde{x}}_1$  vers 0 en temps fini  $t_0$ . Ensuite, on démontre que pour  $t \geq t_0$  la surface de glissement  $\tilde{x}_2 = 0$  est attractive assurant la convergence de  $\hat{x}_2$  vers  $x_2$  satisfaisant les inégalités (7.61) et (7.62). La preuve de convergence de cet observateur peut être trouvé en détails dans [DF05].

Afin d'identifier les entrées inconnues  $U = (u_1 \ u_2)^T$ , l'équation (7.63) suivante est utilisée:

$$\begin{cases} u_1 = (m_1 \ddot{z}_{r1} - B_1 \dot{q}_1 + k_1 \frac{T_w}{2} \sin(\phi) \\ + B_1 \frac{T_w}{2} \cos(\phi) \dot{\phi} - k_1 q_1 + k_3 z_{r1}) / k_3 \\ u_2 = (m_2 \ddot{z}_{r2} - B_2 \dot{q}_2 - k_2 \frac{T_w}{2} \sin(\phi) \\ - B_2 \frac{T_w}{2} \cos(\phi) \dot{\phi} - k_2 q_2 + k_4 z_{r2}) / k_4 \end{cases} \quad (7.63)$$

Mais d'abord, les accélérations verticales des roues  $\ddot{\tilde{z}}_{r1}$  et  $\ddot{\tilde{z}}_{r2}$  sont estimées par une double dérivation du système d'équation défini dans (7.9) et en assumant que l'angle de roulis est faible:  $\sin(\phi) = \phi$  and  $\cos(\phi) = 1$ , nous obtenons:

$$\begin{cases} \ddot{\tilde{z}}_{r1} = \ddot{\tilde{z}} - \dot{\hat{q}}_1 - \frac{T_w}{2} \ddot{\hat{\phi}} \\ \ddot{\tilde{z}}_{r2} = \ddot{\tilde{z}} - \dot{\hat{q}}_2 + \frac{T_w}{2} \ddot{\hat{\phi}} \end{cases} \quad (7.64)$$

A l'instant  $t > t_0$ , la convergence de l'accélération verticale du châssis est alors assurée en utilisant l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \ddot{\tilde{z}} = & ((k_1 \hat{q}_1 + k_2 \hat{q}_2 + (k_1 - k_2) \frac{T_w}{2} \sin(\hat{\phi})) / m + \\ & B_1 \dot{\hat{q}}_1 + B_2 \dot{\hat{q}}_2 - (B_1 - B_2) \frac{T_w}{2} \cos(\hat{\phi}) \dot{\hat{\phi}}) / m \end{aligned} \quad (7.65)$$

Les accélérations verticales des suspensions  $\ddot{\hat{q}}_1$  et  $\ddot{\hat{q}}_2$  ont été estimées en utilisant l'observateur décrit dans (7.57). Cependant, cette estimation peut engendrer du bruit. C'est pourquoi

un filtre est appliquée afin d'y remédier. Dans ce cas et d'après (7.63) et (7.64), les entrées inconnues sont estimées.

Ce travail de recherche sur l'estimation des caractéristiques de l'infrastructure a fait l'objet de plusieurs publications dans des revues à comités de lecture et dans des conférences internationales ([IDM06], [IF07], [IF08], [IBF09]).

## 7.5 Conclusion

La sécurité des poids lourds constitue encore aujourd'hui une problématique majeure pour les pouvoirs publics. C'est pourquoi au cours de ces dernières années, je me suis intéressé à développer des modèles dynamiques de PL pour étudier et comprendre leurs comportement en interaction avec l'infrastructure. J'ai également développé un certain nombre d'outils afin de réduire les risque d'accidents. Deux approches sont étudiées, une approche déterministe et une autre probabiliste. On a pu constaté que le risque le plus répandu pour ce genre de véhicule est le renversement. C'est également le risque qui fait plus de dégâts matériels et humains. C'est pour cette raison que je me suis impliqué fortement dans le développement d'un système de prédiction de renversement que j'ai testé en temps réel avec un véhicule instrumenté sur la piste de la Valbonne près de Lyon, dans le cadre du projet VIF. Les résultats étaient très satisfaisants puisque le système développé permettait d'estimer en temps réel la dynamique du véhicule et de prédire le risque renversement. Une alerte est ensuite envoyée dans les temps au chauffeur (à 3s du risque) afin qu'il puisse réagir pour réduire sa vitesse. Cependant, afin que ce travail soit totalement validé, des expérimentations sur un tracteur semi-remorque qui constitue le véhicule qui se renverse le plus, doivent être réalisées sur route ouverte ou sur piste.

Les méthodes de contrôle développées pour aider le conducteur à éviter le renversement ou la sortie de route de son PL, ont donné des résultats très satisfaisants. L'avantage de ces méthodes c'est qu'elles sont basées sur des contrôleurs robustes et facile à implémenter. Il reste tout de même qu'elles ne sont validées qu'en simulation en utilisant le logiciel PROSPER. Dans ce cas ci également, des expérimentations qui viendront conforter les résultats de simulation sont nécessaires.



---

## Chapitre 8

# Pesage dynamique et embarqué des PL

---

### 8.1 Introduction

Un autre travail de thèse que j'ai encadré entre octobre 2007 et décembre 2010, consiste à développer un système de pesage embarqué de poids lourd, par l'estimation des forces d'impact dynamiques [Khe10].

Le choix d'un modèle approprié de poids lourds tenant compte des caractéristiques de l'infrastructure est étudié et les paramètres du modèle tels que les coefficients de raideur ou d'amortissement sont identifiés pour augmenter la fiabilité de l'estimation ([KID10d], [KID10b], [KID10e], [IK11]).

Afin de valider les algorithmes d'estimation, des expérimentations sur un manège de fatigue sont effectuées en mars 2010 en collaboration avec ARRB (Australian Road Research Board), un laboratoire de recherche australien [JS82].

Le pesage en marche des PL constitue une thématique majeure à laquelle le ministère s'intéresse depuis plusieurs années. Ces derniers temps, plusieurs chercheurs et industriels se sont intéressés à cette problématique, notamment le pesage en marche embarqué.

Les poids lourds sont soumis à différentes règles concernant la qualification des chauffeurs, la vitesse mais aussi le poids du chargement. Chaque poids lourd possède un poids maximal en charge à ne pas dépasser sous peine d'être en surcharge. Les poids lourds en surcharge deviennent instables et par conséquent peuvent provoquer des accidents puisque les distances de freinage augmentent et les risques de renversement deviennent élevés notamment en présence de forts vents en virage. Un véhicule en surcharge provoque également des dégradations sur l'infrastructure et sur les ponts. De même, les sociétés de

transport ayant des camions en surcharges, bénéficient d'un avantage compétitif par rapport à celles qui respectent la législation mais également aux autres modes de transport (ferroviaire et maritime) ce qui engendre de la concurrence déloyale. Le pesage des poids lourds présente donc une utilité commerciale, économique et sociale.

A l'aide d'un système de pesage, les transporteurs chargent correctement leurs véhicules en évitant des surcharges ou des sous-charges. Ils atteignent ainsi un chargement optimal ce qui leur permet d'utiliser leurs véhicules au maximum de leur capacité. Les gestionnaires des routes et des infrastructures ont recours au pesage pour verbaliser les contrevenants en surcharge sources de danger sur la route.

La connaissance du poids en temps réel du véhicule peut être appliquée :

- dans les systèmes d'aide à la conduite: en effet la connaissance en temps réel de la force d'impact dynamique est très importante pour par exemple, calculer le transfert de charge et de ce fait, prévenir le risque de renversement des PL ([ID06b], [ID07b], [IMS08]).
- pour le contrôle des surcharges: la charge dynamique peut dans certains cas, présenter un risque d'endommagement de la chaussée. Sa connaissance permet d'éviter ce risque en retardant ou en interdisant l'accès du PL surchargé à l'infrastructure ([FEI+08], [KID10a]).
- pour calibrer les stations de pesage en marche déjà présentes dans quelques sites ([HH02], [HvAH+05]).

Nous nous sommes donc intéressés à cette thématique et nous avons proposé des solutions afin de développer un système économique et fiable de pesage embarqué dans les poids lourds basé sur l'estimation des forces d'impact dynamiques.

## 8.2 Développement d'un système économique et fiable de pesage embarqué dans les poids lourds

Le pesage dynamique embarquée des PL passe par la connaissance des forces d'impact dynamique entre le pneu et la chaussée. Pour estimer ces forces, nous avons utilisé la théorie des modes glissants qui permet d'observer les états non mesurés du véhicule et de ce fait, économiser l'utilisation de capteurs supplémentaires et ainsi que l'estimation des forces verticales.

Pour pallier à ce problème, nous avons proposé un observateur à modes glissants et à gains variables qui permet d'obtenir une inversion implicite du modèle. Pour ce faire, nous procédons à une augmentation d'état du modèle.

A partir des équations mécaniques décrites dans le chapitre précédent sur la modélisation du PL, nous pouvons dériver le modèle d'état sur lequel sont basées les algorithmes

d'estimation.

Le vecteur d'état noté  $Xv$  contient les différentes vitesses de rotation des roues, respectivement  $w_{fw}$  et  $w_{rw}$  pour le tracteur et  $w_{tw}$  pour la remorque, ainsi que les vitesses de lacet du tracteur et de la remorque, respectivement  $\dot{\alpha}_1$  et  $\dot{\alpha}_2$  :

$$Xv = [\dot{\alpha}_1 \ w_{fw} \ w_{rw} \ \dot{\alpha}_2 \ w_{tw}]^T \quad (8.66)$$

Les entrées connues du modèle  $u$  sont les couples à l'avant et à l'arrière du tracteur et le couple à la remorque ainsi que l'angle de braquage et l'angle de lacet relatif:

$$u = [T_{fw} \ T_{rw} \ T_{rw} \ \delta \ \theta]^T \quad (8.67)$$

On considère les forces longitudinales, latérales et les forces à la sellette comme entrées inconnues:

$$u_f = [F_{fx} \ F_{rx} \ F_{tx} \ F_{fy} \ F_{ry} \ F_{ty} \ X_h \ Y_h]^T \quad (8.68)$$

Nous maintenons le vecteur vitesse  $Xv$  dans l'état et nous considérons les forces inconnues  $u_f$  comme un état additionnel piloté par une entrée inconnue que l'on note  $\mu$  supposée bornée.

$$\begin{cases} X_1 = Xv \\ u_f = X_2 \\ \dot{u}_f = \mu \end{cases} \quad (8.69)$$

Finalement le modèle d'état est donné par :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = Bu + W_1(u)X_2 \\ \dot{X}_2 = \mu \end{cases} \quad (8.70)$$

Les sorties du modèle peuvent être réécrites sous cette forme :

$$\begin{cases} Y_1 = X_1 \\ Y_2 = W_2(u)X_2 \end{cases} \quad (8.71)$$

Les matrices  $B \in \mathfrak{R}^{5 \times 5}$ ,  $W_1 \in \mathfrak{R}^{5 \times 8}$  et  $W_2 \in \mathfrak{R}^{4 \times 8}$  sont données en annexe.

### 8.2.1 Synthèse de l'observateur à modes glissants et estimation des forces d'impact

Le challenge est d'estimer les forces contenues dans la variable d'état  $X_2$ . Pour ce faire, nous procédons en deux étapes. En premier lieu, la quantité  $W_1 X_2$  est estimée puis injectée dans l'observateur à gains variables pour estimer  $X_2$  [KIDF10].

Pour estimer la quantité  $W_1 X_2$ , nous pouvons utiliser un observateur du premier ordre. Etant donné que ce type d'observateur introduit du chattering, nous lui préférons l'utilisation d'un différentiateur exact. Ce dernier permettra d'estimer  $\dot{X}_1$  à partir des vitesses mesurées  $X_1$ . Après convergence,  $W_1 X_2$  peut être calculé.

Le différentiateur appliqué est donné par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}}_1 = Z + \lambda |\tilde{X}_1|^{1/2} \text{Si gn}(\tilde{X}_1) \\ \dot{Z} = \alpha \text{Si gn}(\tilde{X}_1) \end{cases} \quad (8.72)$$

où  $\hat{X}_1$  l'estimée de  $X_1$ ,  $\tilde{X}_1 = X_1 - \hat{X}_1$  est l'erreur d'estimation,  $\alpha$  et  $\lambda$  sont les gains du différentiateur avec:

$$\begin{cases} \lambda = \text{diag} \{ \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 \} \\ \alpha = \text{diag} \{ \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 \} \\ |\tilde{X}_1|^{1/2} = \text{diag} \left\{ |\tilde{X}_{11}|^{1/2}, |\tilde{X}_{12}|^{1/2}, |\tilde{X}_{13}|^{1/2}, |\tilde{X}_{14}|^{1/2}, |\tilde{X}_{15}|^{1/2} \right\} \\ \text{Si gn}(\tilde{X}_1) = \left[ \text{sign}(\tilde{X}_{11}), \text{sign}(\tilde{X}_{12}), \text{sign}(\tilde{X}_{13}), \text{sign}(\tilde{X}_{14}), \text{sign}(\tilde{X}_{15}) \right]^T \end{cases} \quad (8.73)$$

En considérant les vitesses connues et localement bornées, il existe  $\alpha_i$  et  $\lambda_i$  tels que l'erreur d'observation  $\tilde{X}_1$  tend vers 0 en temps fini  $t_0$  pour  $i = 1, \dots, 5$ .

Les gains sont réglés de telle manière que pour tout  $i = 1, \dots, 5$  nous avons :

$$\alpha_i > f^+ = 2 \max(\ddot{X}_{1i}), \quad i = 1..5 \quad (8.74)$$

et

$$\lambda_i > \sqrt[2]{\frac{2}{\alpha_i - 2 \max(\ddot{X}_{1i})} \frac{(\alpha + 2 \max(\ddot{X}_{1i}))(1 + p)}{1 - p}}, \quad i = 1..5 \quad (8.75)$$

Ce qui assure la convergence du différentiateur en temps fini.

Après convergence de  $\dot{\hat{X}}_1$ , nous déduisons la quantité  $W_1(u)X_2 = \dot{\hat{X}}_1 - Bu$ .

Pour évaluer  $X_2$ , nous utilisons l'observateur donné par :

$$\dot{\hat{X}}_2 = \hat{\mu} + K_1 \text{Si gn}(W(u)\tilde{X}_2) \quad (8.76)$$

avec  $\hat{X}_2$  est l'estimée de  $X_2$ ,  $\tilde{X}_2 = X_2 - \hat{X}_2$  est l'erreur d'estimation et:

$$\begin{cases} K_1 = \text{diag} \{ K_{11}, K_{12} \dots K_{18} \} \\ \text{Si gn}(W(u)\tilde{X}_2) = \left[ \text{sign}(W(u)\tilde{X}_2)_1, \text{sign}(W(u)\tilde{X}_2)_2, \dots, \text{sign}(W(u)\tilde{X}_2)_8 \right]^T \end{cases} \quad (8.77)$$

Les éléments de la matrice  $W$  sont définis comme suit:

$$\left\{ \begin{array}{l} W(u)_{1,j} = W_1(u)_{2,j} \\ W(u)_{2,j} = W_2(u)_{1,j} \\ W(u)_{3,j} = W_1(u)_{4,j} \\ W(u)_{4,j} = W_1(u)_{1,j} \\ W(u)_{5,j} = W_2(u)_{2,j} \\ W(u)_{6,j} = W_1(u)_{5,j} \\ W(u)_{7,j} = W_2(u)_{3,j} \\ W(u)_{8,j} = W_2(u)_{4,j} \end{array} \right. \quad (8.78)$$

Cette disposition de la matrice assure que les éléments diagonaux sont non nuls. Ceci sera utile pour le choix du gain de l'observateur. Nous pouvons noter que  $W_1(u)\tilde{X}_2$  est estimé dans la première étape. De plus,  $W_2(u)\tilde{X}_2 = W_2(u)X_2 - W_2(u)\hat{X}_2$ , et en référence aux mesures  $Y_2 = W_2(u)X_2$ , nous pouvons écrire  $W_2(u)\tilde{X}_2 = Y_2 - W_2(u)\hat{X}_2$ . Les matrices  $W_1(u)$ ,  $W_2(u)$  et  $W(u)$  sont à éléments variables et parfaitement connus.

L'erreur d'observation est donnée par:

$$\tilde{X}_2 = \tilde{\mu} - K_1 \text{Sign}(W(u)\tilde{X}_2) \quad (8.79)$$

Pour assurer la convergence de l'observateur, le gain  $K_1$  est choisie de la manière suivante:

$$K_1 = W^T(u)K_2 \quad (8.80)$$

avec  $K_2 = \text{diag}\{K_{2_1}, K_{2_2}, \dots, K_{2_8}\}$  une matrice de gains diagonale constante et  $W^T(u)$  est la transposée de la matrice  $W(u)$ .

Par conséquent, nous obtenons la convergence de  $\hat{X}_2$  vers  $X_2$  en temps fini  $t_1 > t_0$ . L'entrée inconnue  $\mu$  peut être calculée en se référant à l'équation 8.79. En effet, après convergence de  $\hat{X}_2$  vers  $X_2$ , nous avons:

$$\tilde{\mu} = K_1 \text{Sign}(W(u)\tilde{X}_2) \quad (8.81)$$

Sachant que  $\tilde{\mu} = \mu - \hat{\mu}$ , alors:

$$\mu = \hat{\mu} + K_1 \text{Sign}(W(u)\tilde{X}_2) \quad (8.82)$$

### 8.2.2 Validation expérimentale

La validation expérimentale de l'estimation des forces d'impact dynamique a été réalisée de deux manières que nous présentons dans cette partie.

### 8.2.2.1 Validation sur un véhicule à l'arrêt

La première expérimentation que nous avons réalisée afin de valider l'approche proposée a été réalisée dans les locaux de CERAM<sup>1</sup>, à Mortefontaine, sur un véhicule à l'arrêt représenté sur la figure 8.34.



Figure 8.34: Véhicule instrumenté

Le véhicule a été équipé de plusieurs capteurs pour mesurer la dynamique du véhicule. Les forces d'impact sont mesurées par des vérins hydrauliques qui excitent le véhicule dans le sens vertical (voir figure (8.35)).



Figure 8.35: Vérin hydraulique excitant le véhicule

<sup>1</sup><http://www.ceram-mortefontaine.fr/>

Ces mesures ont servi de référence pour valider les estimations des forces d'impact.

Cette première expérience a été très bénéfique puisqu'elle a permis de valider l'approche utilisant les observateurs à modes glissants même si le modèle utilisé est celui d'un véhicule léger.

### 8.2.2.2 Validation sur un manège de fatigue

L'expérimentation a eu lieu à Melbourne, en partenariat avec l'Australian Road Research Board. Elle a eu pour support ALF (Accelerated Loading Facility) représenté sur les figures 8.36 et 8.37.



Figure 8.36: Tandem de ALF



Figure 8.37: Vue latérale de ALF

ALF, est un manège de fatigue permettant de reproduire l'effet de passages successifs de charge d'un poids lourd sur une portion de chaussée. Ce qui permet d'évaluer la réaction et la durée de vie d'une enrobée de chaussée. ALF est muni d'un système de suspension pneumatique équivalent à celui installé sur poids lourd. Il est composé de deux montes (roues jumelées), une à l'avant et une à l'arrière. La charge statique peut varier en 40 et 100kN à raison de 10kN. La vitesse de déplacement est limitée à 22km/h, les deux roues étant entraînées par un moteur électrique de 22kW.

Plus de détails peuvent être trouvés dans [GBGR07].

Un certain nombre de capteurs sont installés sur ALF:

- 4 jauges de déformation : sur la barre d'essieu, ils permettent d'évaluer les forces d'impact. Il s'agit de la référence sur la mesure de la force d'impact,
- 2 capteurs de déplacement pour la monte avant et la monte arrière: de type LVDT, afin de mesurer les débattements de suspension,
- 2 capteurs de pression pour la monte avant et la monte arrière: ils permettent de mesurer les pressions du coussin d'air de suspension,
- 2 accéléromètres pour la monte avant et la monte arrière: pour mesurer les accélérations verticales des roues.

Les jauges sont placées à proximité du moyeu des roues, elles permettent de mesurer les déformations dues aux efforts tranchant et par conséquent des forces verticales. Il s'agit de la méthode de l'instrumentation des essieux. Cette méthode permet d'avoir une référence sur la mesure afin de comparer les signaux issus du modèle en supposant que l'erreur sur la mesure de la force d'impact soit inférieure

### 8.3 Applications du pesage embarqué: contrôle hybride

Cette partie du travail de recherche s'inspire de la première partie concernant l'amélioration de la sécurité des poids lourds. On montre ici une des applications du pesage embarqué dynamique pour atteindre cet objectif.

Sur l'application de la commande hybride aux poids lourds, Il existe quelques références en littérature. On peut citer les travaux de Wang et Tomizuka [WT01] qui ont utilisé une commande hybride pour l'asservissement de la trajectoire du véhicule lors d'un changement de file. Dans ce travail, une méthode de commande hybride est développée afin de stabiliser les variations de la force d'impact. Une étude intéressante a également été proposée par Lewis et El-Gindy [LEG03]. Il s'agit d'une commande par braquage actif d'un véhicule semi-remorque. La méthode est développée en utilisant les modes glissants. Une

approche hybride basée sur l'accélération latérale de la remorque est proposée et validée par simulation. Le système de commande développé dans ce travail, est basé sur les techniques de commande hybride. En effet, deux états peuvent être distingués : celui où il y a un risque et un second où le risque est moindre, voire absent. La plus-value que rapporte un tel système de commande est de pouvoir alerter le conducteur mais également de réagir au bon moment afin d'éviter l'accident.

Les conducteurs de poids lourds, même expérimentés, peuvent commettre des erreurs lors de manoeuvre tels que le changement de voie ou lors de prise de virage [KID10a]. Les transferts de charge qui, suivant la charge transportée, la vitesse et l'état du véhicule peuvent engendrer des situations dangereuses. Il est difficile pour le conducteur d'évaluer le degré d'instabilité du véhicule lors de la conduite et de réagir au bon moment. La piste que l'on propose dans ce travail consiste à utiliser un système de contrôle actif qui agit en deux temps : il va tout d'abord alerter le conducteur lorsque le risque atteint un seuil critique dans la remorque, et de déclencher en même temps une commande. On évalue en général le temps de réaction à 3 secondes. Le principe sera donc d'appliquer une commande stabilisatrice sur un très bref délai inférieur au temps de réaction du conducteur. De cette manière, le système de commande aura assisté le conducteur et lui sera en même temps complètement transparent puisque le contrôleur est arrêté avant même que le conducteur ait réagit.

Pour évaluer le degré de stabilité de la remorque, nous introduisons le taux de transfert de charge LTR qui est fonction des forces verticales comme décrit précédemment.

Pour l'automate hybride, nous définissons deux états discrets : l'état où le contrôleur est "off". Le conducteur agit seul sur l'angle de braquage. Il s'agit de la situation nominale où il n'y a pas de risque de renversement ou d'instabilité de la remorque. Le second état est "on". Dans ce cas, le contrôleur est activé afin d'assister le conducteur lors de la manoeuvre. Le principe de fonctionnement de ce contrôleur est présenté sur la figure 8.38.

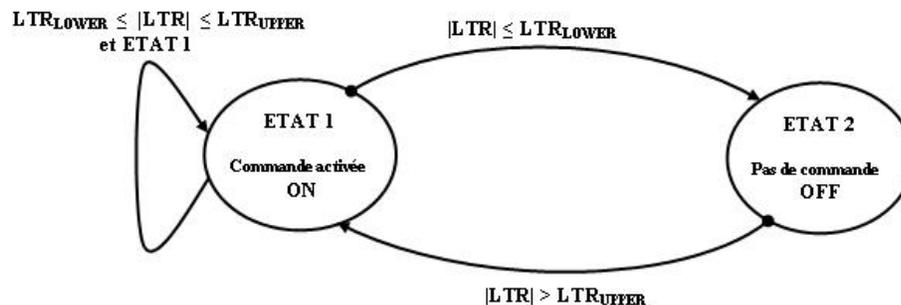


Figure 8.38: Description du contrôleur hybride

La transition entre les deux états est basée sur le LTR. On définit une plage de variation dans laquelle le contrôleur est activée. Cette plage est définie par une limite inférieure  $LTR_{LOWER}$  et une limite supérieure  $LTR_{UPPER}$ .

Les transitions sont faites comme suit :

1- si  $|LTR| \leq LTR_{UPPER}$  : le contrôleur est 'off', il n'y a que le conducteur qui agit sur le véhicule.

2- quand  $|LTR| > LTR_{UPPER}$  et que le contrôleur est 'off', il est mis 'on'.

3- si  $LTR_{LOWER} \leq |LTR| \leq LTR_{UPPER}$  alors le contrôleur est mis 'on' et il est maintenu actif jusqu'à ce que  $|LTR| \leq LTR_{LOWER}$ .

## 8.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce travail de recherche quelques pistes permettant d'estimer en temps réel et en embarqué les forces d'impact dynamiques. Ces dernières peuvent être utilisées dans l'étude du risque d'accident du PL. Nous avons démontré dans les quelques résultats présentés que la connaissance de ces forces est primordiale pour calculer le transfert de charge entre les roues d'un même essieu et de ce fait, évaluer le risque de renversement. Se basant sur des estimateurs robustes à modes glissants, un modèle dynamique de PL doit être soigneusement choisi et développé afin de représenter au mieux le comportement du PL. C'était donc la première étape de ce travail. Un modèle de PL a été validé par le simulateur PROPSE et par des données expérimentales issues du projet VIF. Ensuite, divers méthodes basées sur les observateurs à modes glissants ont été développées et simulées. Afin de valider l'approche, des expérimentations ont été effectuées sur un banc d'essai constituant un tandem de PL. C'est un travail qui a été réalisé à Melbourne en collaboration avec l'équipe de recherche australien de l'ARRB. Nous avons pu constater que l'estimation des forces d'impact est très satisfaisante comparée à la mesure donnée par une jauge de contrainte placée sur le banc. Un rapport d'expérimentation et de validation de l'algorithme développé a été rédigé, à cet effet. Comme perspective à ces travaux, une expérimentation avec un tracteur semi-remorque est étudiée afin de valider l'approche développée en temps réel sur un PL instrumenté et sur piste. A cet effet, nous avons soumis le projet HPWIM pour un financement FUI où nous proposons d'instrumenter un certain nombre de PL ainsi que l'utilisation d'une station de pesage en marche. Le but étant d'embarquer le logiciel ainsi développé afin d'estimer les forces d'impact et de comparer le résultat à la mesure qui sera donnée par la station de pesage.

---

Dans une autre méthode, nous avons mis au point un contrôleur hybride afin de stabiliser les forces d'impact gauche et droit du véhicule. Ils s'avèrent que les premiers résultats sont très intéressants mais que nous devons encore améliorer, notamment en appliquant des contrôleurs robustes.



---

## Chapitre 9

# Etude du comportement des deux roues motorisés

---

### 9.1 Introduction

La nouvelle unité mixte de recherche LEPSIS est le résultat de la fusion de l'unité de recherche MSIS de l'ex l'INRETS et de la division ESE de l'ex LCPC. Le LEPSIS est composé d'une cinquantaine d'agents dont 20 chercheurs, travaillant dans le domaine des infrastructures routières et de leurs équipements pour en connaître et en améliorer les conditions d'exploitation tout en améliorant la sécurité des usagers et en prenant en compte les contraintes du développement durable. Elle conduit des recherches, définit des concepts, développe des outils et des méthodes qualifiées pour répondre aux besoins des décideurs, des gestionnaires et des usagers du système de trafic routier.

La simulation de conduite est un outil privilégié pour conduire des recherches prenant en compte les facteurs humains. Cet outil, dont l'usage est de plus en plus répandu est toutefois toujours objet de recherche. La question de la transférabilité des résultats obtenus en situations virtuelles vers les situations réelles pose celle de la validité de l'outil et de sa capacité à permettre l'étude des comportements humains sans biaiser ces derniers. Cette question cruciale, en particulier dès qu'il s'agit de traiter de problèmes liés à la sécurité routière, est difficile et peu abordée dans la littérature scientifique.

L'unité mixte de recherche développe en partenariat avec l'UPSud-IEF et l'UEVE-IBISC des motos instrumentées et un simulateur de conduite moto, notamment dans le cadre de projets ANR/PREDIT (SUMOTORI, puis SIMACOM et DAMOTO) ([[ANH<sup>+</sup>10](#)], [[ANBE11](#)]).

En interne, et afin d'approfondir la connaissance sur le comportement dynamique des motos, l'unité travaille à la mise au point d'une moto (Aprilia Mana 850) à pilotage

automatisée (projet ROBOMOTO). A cet effet, j'ai proposé une méthode basée sur les approches que j'ai déjà appliquées aux VL et aux PL et qui sont déjà citées précédemment. C'est un travail qui se fait dans le cadre de la thèse de A. Khettat que j'encadre.

Les travaux de recherche conduits portent sur :

- une analyse bibliographique sur les modèles de dynamique moto et sur les méthodes de contrôle/commande
- le développement de modèles dynamique de motos
- le développement d'outils de commande afin de contrôler la trajectoire de la moto
- Instrumentation de la moto robotisée et intégration du système de contrôle/commande
- la réalisation de tests de validation sur piste.

Une instrumentation de la moto a déjà été réalisée. Elle reprend les solutions déjà développées sur les motos instrumentées. Ce travail a fait l'objet d'une publication à WoSSPA2011, 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications qui s'est déroulé en Algérie en Mai 2011 [KBIE11a]. Un autre papier sur l'identification paramétrique de la moto a été publié dans le congrès IFAC, Mechatronics en 2010 [NKA<sup>+</sup>10]. Le développement des algorithmes de contrôle et d'estimation est en cours et les premiers résultats sont présentés ici [KBIE11b]. L'implémentation de ces algorithmes sur la moto et les essais sur piste constituent la prochaine étape de ce travail.

## 9.2 Modélisation des deux roues motorisés

En abordant la modélisation de la moto, on se rend compte que des similitudes existent entre un modèle de moto et un modèle de voiture ou de poids lourd étudié précédemment. En effet, comme ce qu'on a vu sur le poids lourd, un modèle de moto se compose également de plusieurs parties qui sont (voir figure (9.39)):

- la masse suspendue (cadre ou châssis) reliée aux masses non suspendues (roues) par des suspensions (ressorts, amortisseurs),
- 2 masses non suspendues (roues)
- le contact roue/sol
- des entrées de braquage issues du guidon

Cependant et comparé à un modèle de voiture ou de poids lourd, la modélisation de la moto doit être faite en tenant compte de quelques spécificités qui lui sont liées.

En effet, nous pouvons noter, contrairement aux autres véhicules pré-cités que:

- la moto reste instable à l'arrêt sans intervention extérieure,
- l'angle de roulis est beaucoup plus important dans le cas d'une moto. Ce qui peut

rendre son renversement plus fréquent,

- l'angle de carrossage est plus important,

- le rôle du pilote est très important puisqu'il agit sur l'angle de guidon pour le maintien de la moto sur sa trajectoire en toute sécurité.

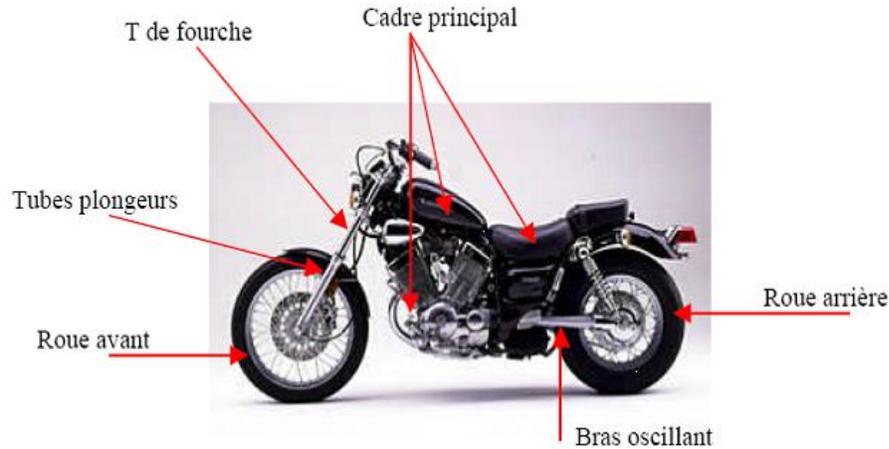


Figure 9.39: Schéma d'un deux roues motorisés

Une moto représente donc un système mécanique très complexe dont la modélisation mathématique est difficile. La modélisation détaillée de certaines de ses parties peut se rendre nécessaire. En effet, plusieurs de ces parties représentent un système si complexe que le comportement est difficilement modélisable.

### 9.2.1 Etat de l'art

On trouve dans la littérature plusieurs travaux qui traitent de la modélisation des deux roues motorisés. Différents modèles plus ou moins complexes existent selon l'application considérée (mono/multi corps, contact pneu-chaussée simplifié, . . . etc). Le choix du modèle est très important puisque il dépend de la précision que l'on veut avoir, de la puissance de calcul que l'on a, et aussi du nombre de paramètres connus ou identifiables.

L'approche mathématique de Sharp, réalisée en 1971 sur la dynamique des motocycles en libre contrôle, c'est à dire sans impliquer les mouvements et action du pilote est reconnue comme l'un des modèles les plus élaborés. Ce modèle a depuis été réutilisé au cours de différentes études, comme par exemple pour examiner l'influence des accessoires sur le véhicule ou pour étudier le contrôle du pilote de sa moto [Sha71]. Sharp a effectué une analyse lagrangienne des mouvements d'une moto, considérant le véhicule comme étant un ensemble de deux corps rigides, en plus d'un mécanisme de direction, comme le montre

la figure (9.40).

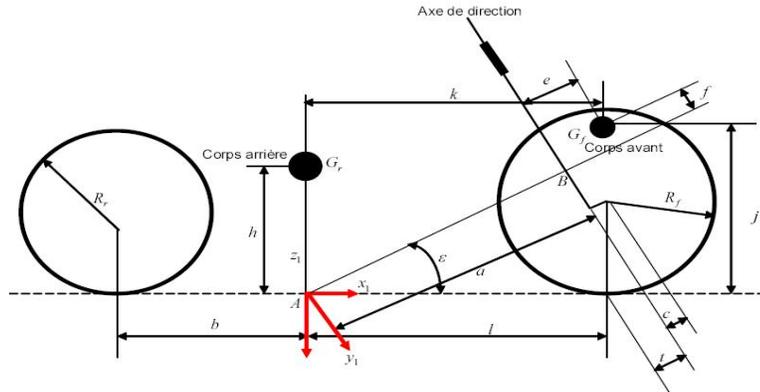


Figure 9.40: Géométrie du véhicule deux-roues pour le modèle Sharp (1971)

Les caractéristiques de ce modèle dynamique sont comme suit :

- le premier corps  $G_f$  est composé de la roue avant, de la fourche et du guidon,
- le deuxième corps  $G_r$  est composé de la structure principale, de la roue arrière, du moteur, du réservoir, du siège et du système d'amortissement arrière. Le conducteur est rigidement lié au corps arrière.

Ce modèle permet de simuler les *4ddl* qui sont le déplacement latéral, le mouvement du lacet, le roulis ainsi que le mouvement de direction du guidon.

Pour obtenir un modèle linéaire, certaines suppositions ont été formulées :

- les roues sont modélisées par des disques rigides,
- le point de contact pneu sol est décrit comme l'intersection du plan vertical de la roue avec le plan de la chaussée,
- la route est supposée parfaitement plate sans irrégularités,
- la vitesse longitudinale est constante, par conséquent, l'équation du déplacement longitudinal est absente dans le modèle,
- seules les petites perturbations en mouvement linéaire sont considérées.

Sharp a utilisé ce modèle pour effectuer une analyse de la stabilité, en calculant les valeurs propres du modèle linéaire. Deux cas sont considérés, l'un où le degré de liberté de la direction n'est pas pris en compte, donnant lieu au contrôle fixé (fixed control), l'autre où le degré de liberté concernant la direction est pris en compte, donnant naissance au contrôle libre.

L'analyse de la stabilité a donné des résultats plus intéressants en mode contrôle libre qu'en mode au contrôle fixé. Il a aussi constaté la présence des modes de nature oscillatoire,

appelés Capsize, Weave et Wobble. D'autres modes sont jugés insignifiants parce qu'ils sont suffisamment amortis. Ces trois modes principaux sont définis comme suit:

- « Capsize » : ce mode est apériodique, nécessitant le roulis de la moto. Il peut être stable ou non stable. S'il est instable, la divergence en roulis est lente. Sa stabilité dépend de la vitesse longitudinale.

- « Weave » : le véhicule subit des mouvements latéraux périodiques, nécessitant la direction, le lacet et le roulis. Sa fréquence dépend de la vitesse et varie entre  $1Hz$  et  $3Hz$  à des vitesses élevées. Les oscillations sont bien amorties pour des vitesses moyennes. Il est instable pour de très petites ou de grandes vitesses.

- « Wobble » : caractérisé par un mouvement oscillatoire du corps avant par rapport à son axe de rotation. Il est de nature haute fréquence, de  $6Hz$  à  $10Hz$  et relativement indépendant de la vitesse. Les caractéristiques oscillatoires de la fourche sont influencées par l'amortissement de direction et par conséquent, il dépend de la manière avec laquelle le conducteur manipule son guidon.

Cependant, le modèle de Sharp fait encore défaut pour la stabilité à cause du « Wobble mode ». Cette lacune ne permet donc pas de simuler correctement le comportement de la moto puisque les propriétés de ce mode oscillatoire spécifique ne sont pas prises en compte. Par conséquent la divergence entre le modèle théorique et la réalité devenait de plus en plus évidente.

Eaton et Segel [ES73] ont modifié les équations de Sharp pour intégrer le couple d'auto-alignement et le couple de renversement. Néanmoins, des disconcordances ont été relevées entre les résultats analytiques et physiques attribuées à l'incohérence des équations du pneumatique. Un gros effort a été porté dans la description détaillée du comportement des pneumatiques pour certains points de fonctionnement. Malheureusement les défaillances du modèle principal persistaient.

[Sha76] présente la première tentative pour étudier les effets de l'accélération et de la décélération sur la stabilité de la moto. Cependant, l'approche utilisée est plutôt simpliste, puisqu'elle considère que les équations du mouvement longitudinal sont découplées de celles du mouvement latéral.

Après le constat de Segel [SW75] qu'un modèle plus raffiné de pneu était nécessaire pour décrire le comportement de la moto, Sharp et al [SJ77] ont développé un modèle complet de pneu, et ont évalué l'influence des différents paramètres sur le modèle, afin de déterminer quelques aspects du comportement réel des pneumatiques. Les effets de transfert de charge aérodynamique ont été incorporés dans ce modèle. Malheureusement, ceci n'est pas suffisant pour expliquer la divergence entre la théorie et l'observation.

L'objectif principal de Weir et al ([WZ78], [WZT78]) était d'étudier les effets de commande du conducteur sur la stabilité du véhicule. Une analyse théorique a été faite par l'intermédiaire d'un modèle mathématique de la moto et un modèle de commande simple du conducteur dans des conditions de roulement en ligne droite, pour démontrer que la commande du conducteur est plus influente sur le déplacement latéral et directionnel de la moto.

L'écart entre le théorie et la pratique a été expliqué et largement surmonté par Sharp et Alsted [SA80]. Ces derniers ont utilisé un modèle de pneu que jamais plus réaliste. Ce modèle comprenait l'examen de la largeur de la bande de roulement, la distorsion longitudinale de la gomme, les effets gyroscopique de la masse de roulement et l'ajustement des paramètres en fonction de la charge. Les nouveaux degrés de liberté dans le modèle étaient la flexibilité de la torsion du corps avant par rapport à l'axe parallèle de l'axe de direction, la flexibilité de la roue par rapport à la fourche le long de l'axe de la fusée, la flexibilité de la torsion de la tête de direction par rapport à un axe normal à la l'axe de direction. Dans tous les cas, la restriction des mouvements de ses degrés de liberté est assurée par des ressorts et amortisseurs linéaires. Les paramètres tels que les raideurs du cadre, la masse et les propriétés géométriques du véhicule des quatre grands constructeurs de motos de l'époque ont été utilisés pour effectuer des analyses. La variation de la rigidité dans la torsion associée à la flexibilité de l'axe de direction, a donné lieu à de très petits changements dans les propriétés de stabilité, mais les niveaux de rigidité latérale à l'axe de la roue détériore l'oscillation du mode Wobble, et une légère diminution du mode Weave à grande vitesse.

Spiers [Spi81] par le biais d'une étude indépendante, a confirmé le principal résultat ci-dessus. Il a utilisé une analyse plus profonde afin d'évaluer les différentes contributions de la déformation latérale du couple gyroscopique sur la stabilité. Il a constaté que, bien que le terme gyroscopique a un effet stabilisateur, la déformation latérale a agi dans le sens inverse de leur changement important relative à la vitesse.

Une étape importante dans l'analyse théorique de la moto a été faite par Koenen [Koe83] en s'appuyant sur les travaux précédents ([KP80], [KP82]). Le modèle mis au point considère de petites perturbations sur les conditions de roulement en ligne droite, mais aussi sur les conditions précédant le virage. Le couplage des modes in-plane et out-of-plane augmente avec l'augmentation de l'angle de roulis, et par conséquent, il a été reconnu que le degré de liberté de l'oscillation verticale, du tangage et de la suspension doivent être inclus dans le modèle. Les pneus ont été traités comme des disques minces flexibles radialement, et leur largeur a été prise en compte par l'ajout du couple de renversement,

résultant à partir de la considération du déplacement latérale du point de contact dans le profil des pneus. Les forces latérales et les moments étaient supposées être appliquées à des points de contact en réponse à des angles de glissement, l'angle de carrossage (cambrure) et « turnslip ». La variation de la force latérale avec le glissement latéral est supposée linéaire avec la rigidité au virage dépendant de l'angle de carrossage et de la poussée de la cambrure. Ces deux forces variant linéairement avec la charge normale.

Katayama et al [KAN88] ont utilisé un modèle de moto avec conducteur, afin d'étudier les actions de ce dernier et leurs effets sur la description du comportement réel. Le modèle du conducteur dans ce cas, comprenait une partie inférieure du corps, capable de se pencher librement sur le cadre au lieu de se déplacer latéralement, en tenant compte également des actions de contrôle de la partie supérieure, par l'intermédiaire du couple de direction. Les résultats indiquent que la principale source de contrôle est le couple de direction, alors qu'il est possible de contrôler la moto avec des petits mouvements de la partie inférieure du conducteur. Normalement, la partie inférieure du conducteur est utilisée pour assister la direction du couple, et la partie supérieure du corps contrôle uniquement le maintien du conducteur dans une position verticale confortable.

S'inspirant des travaux antérieurs, Sharp [Sha94] a développé un modèle de moto dont les paramètres de conception et les propriétés des pneus ont été obtenus par une expérience au laboratoire. Les caractéristiques du modèle dynamique du véhicule deux roues sont montrées sur la figure (9.41):

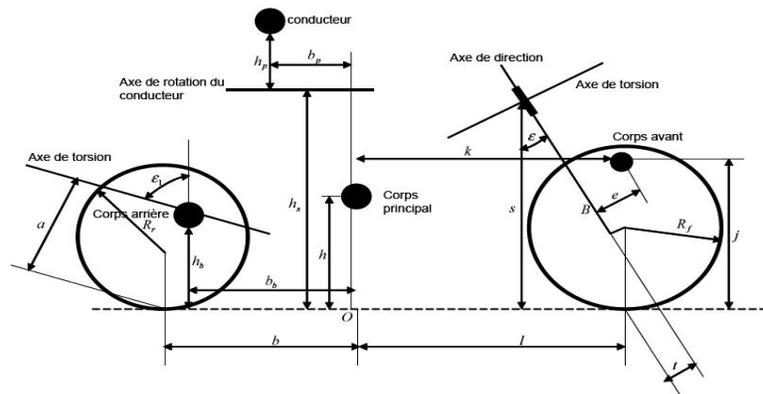


Figure 9.41: Représentation du modèle de Sharp (1994)

Ce modèle permet donc de simuler  $8ddl$  qui sont, le mouvement latéral et transversal du point de référence  $O$ , le mouvement du lacet du corps arrière, le mouvement du roulis du corps arrière, le mouvement latéral de l'axe de direction par rapport au corps arrière, le mouvement de torsion de l'axe de direction par rapport au corps arrière, le mouvement

de la direction du corps avant par rapport au corps arrière, le mouvement de torsion de l'assemblage de la roue arrière par rapport au corps arrière et le mouvement du roulis de la partie supérieur du conducteur par rapport au corps arrière.

Reconnaissant la nécessité pour les méthodes automatisées en multicorps, Sharp et al [SL01] ont proposé en 2001 un modèle intégrant la suspension et une représentation plus élaborée du contact pneu chaussée, issue d'une formulation développée par Koenen [Koe83]. Les avancées apportées par rapport aux modèles précédents ont permis d'explorer la dynamique de ce type de véhicule pour de larges mouvements autour de l'équilibre. Par la suite, une extension de cette étude est proposée conduisant à un modèle qui fut le plus complet de la littérature. La particularité de ce modèle est l'utilisation de l'équation de Pacejka pour la description complète des forces et moments du contact pneu chaussée, ainsi que la combinaison entre les efforts longitudinaux et latéraux.

La figure 9.42 schématise la géométrie de la moto correspondant à la configuration nominale en équilibre.

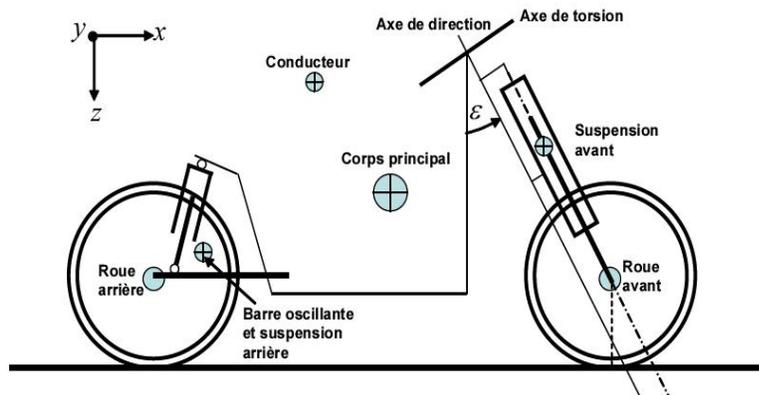


Figure 9.42: Représentation du modèle de Sharp (2001)

Les éléments de base du véhicule sont les suivants :

- corps avant et corps arrière qui sont joints par un axe de direction incliné,
- le corps arrière est autorisé à un déplacement longitudinal, latéral et verticale, ainsi que des mouvements de lacet de tangage et de roulis,
- un bras oscillant avec un système de suspension arrière,
- fourche télescopique et système de suspension avant,
- pneu et roue,
- torsion et rotation du corps arrière par rapport au corps avant,
- forces longitudinales pneumatiques proportionnelles et opposées au glissement latéral tel que défini dans [PS91],

- forces latérales pneumatiques et moment découplé avec les forces longitudinales pneumatiques, calculés en utilisant les expressions données dans [Koe83],
- moment de renversement dû à la cambrure, supposé être fonction de la géométrie du point de contact pneumatique instantané,
- effets aérodynamiques in plane simple, de sorte que les réponses de chargement pneumatique répondent correctement à l'évolution de la vitesse,
- un degré de liberté qui permet au corps du conducteur de rouler par rapport au corps arrière de la moto.

Enfin, il faut citer les travaux de l'équipe dirigée par Cossalter de l'Université de Padoue en Italie, qui a présenté un modèle non linéaire contenant 6 corps et qui permet de simuler  $11ddl : 3ddl$  pour le mouvement de la masse du corps principal,  $3ddl$  pour le roulis, le tangage et le lacet,  $1ddl$  pour la direction,  $2ddl$  pour les débattements des deux suspensions avant et arrière et  $2ddl$  pour les rotations des deux roues [CL02].

### 9.2.2 Contribution à la modélisation d'un deux roues motorisé

L'étude des différents travaux existants sur la modélisation d'un deux roues motorisés, a permis de mieux sélectionner un modèle en fonction de l'application qu'on veut mettre au point.

La moto est représentée comme un ensemble de quatre corps rigide comme suit :

- corps principal contenant, la selle, le moteur avec les composants qui tournent autour de l'axe transversal (provoquant des moments de rotation), la partie inférieure du conducteur et le réservoir,
- corps avant constitué du guidon, de la fourche de roue avant,
- corps arrière qui se compose de l'assemblage de la roue arrière,
- la partie supérieure du conducteur.

Le corps principal est doté de 6  $ddl$ ,  $3ddl$  pour la translation selon les axes longitudinal, latéral et vertical, respectivement  $x, y, z$  et  $3ddl$  pour les mouvements de roulis, de tangage et de lacet, respectivement  $\theta, \varphi, \psi$ . La roue arrière possède  $1ddl$  correspondant à l'angle de rotation. La roue avant est composée de  $2ddl$  relatif à l'angle de braquage et l'angle de rotation. Le système complet possède au total  $9ddl$ .

Les efforts extérieurs sont principalement dus au couple qu'exerce le pilote sur le guidon représenté par  $F_{AD}$  sur la figure 9.43, les efforts aérodynamiques ainsi que les efforts de contact qui proviennent de la chaussée.

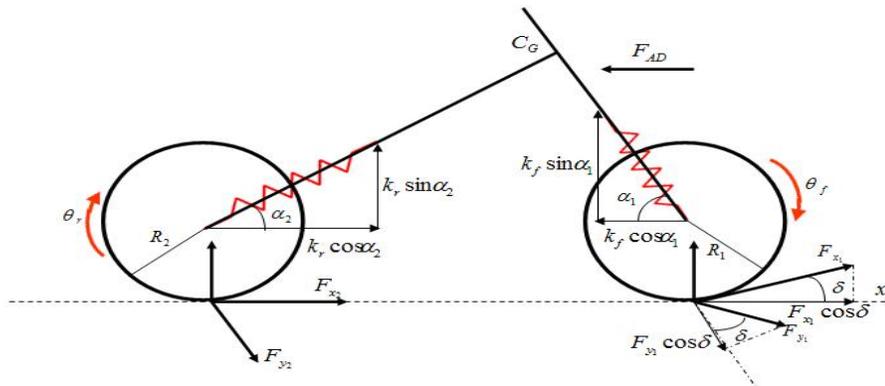


Figure 9.43: Schématisation multi-corps du modèle dynamique de la moto

### 9.2.2.1 Modélisation du comportement dynamique du pneumatique

Le pneumatique représente l'interface entre le véhicule et la route. Il représente le composant le plus complexe du véhicule à cause de sa non-linéarité. Différentes forces et moment agissent sur le pneumatique: les forces latérales, les forces longitudinales, les forces verticales ainsi que les moment d'auto-alignement et le moment de résistance au roulement.

La figure (9.44) illustre ces efforts de contact. Ce contact avec le sol dépend du type et du revêtement de la chaussée.

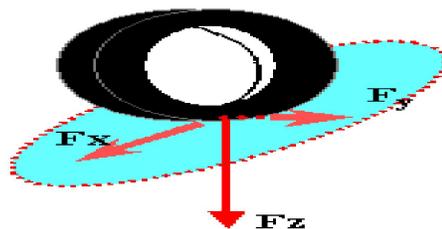


Figure 9.44: Forces au contact pneumatique chaussée

**Force normale** La force normale ou verticale est influencée par la charge supportée par le pneu et par le dénivellement de la chaussée (uni). Elle correspond à la force verticale appliquée à la surface de contact entre le pneu et la route. Elle est fonction du poids du véhicule, de la raideur verticale et de la constante de l'amortisseur du pneumatique.

Ces forces normales à l'avant  $F_{nf}$  et à l'arrière  $F_{nr}$  sont données par:

$$\begin{cases} F_{nr} = K_r \rho_r + B_r \dot{\rho}_r \\ F_{nf} = K_f \rho_f + B_f \dot{\rho}_f \end{cases} \quad (9.83)$$

où  $K_r$  et  $K_f$  représentent respectivement les coefficients de raideur du pneumatique arrière et avant,  $B_r$  et  $B_f$  représentent respectivement les coefficients d'amortissement du pneumatique arrière et avant,  $\rho_r$  et  $\rho_f$  représentent respectivement les écrasements des pneus arrière et avant,  $\dot{\rho}_r$  et  $\dot{\rho}_f$  sont leurs dérivées respectives.

**Force latérale** La force latérale est la force appliquée entre le pneu et la route suivant l'axe  $Y$ . Elle dépend essentiellement de l'angle de dérive et de la charge. Lorsque l'angle de dérive ne dépasse pas quelques degrés, la force latérale peut être approximée par une relation linéaire. La figure (9.45) montre un exemple de variation de la force latérale en fonction de l'angle de dérive.

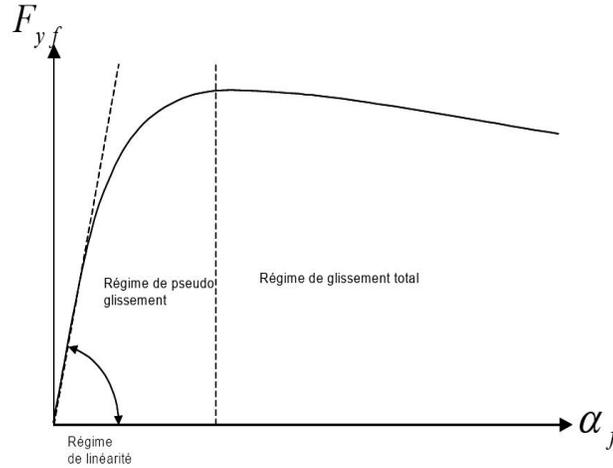


Figure 9.45: Force latérale en fonction de l'angle de dérive

Dans la région de linéarité, on peut alors décrire les forces latérales par le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} F_{yf} = C_{\alpha f} \alpha_f + C_{\gamma f} \gamma_f \\ F_{yr} = C_{\alpha r} \alpha_r + C_{\gamma r} \gamma_r \end{cases} \quad (9.84)$$

Les coefficients  $C_\alpha$  et  $C_\gamma$  sont respectivement les raideurs de dérive et de carrossage,  $\gamma_f$  et  $\gamma_r$  sont respectivement les angles de carrossage de la roue avant et arrière (voir figure (9.46)),  $v$  étant la vitesse du véhicule.

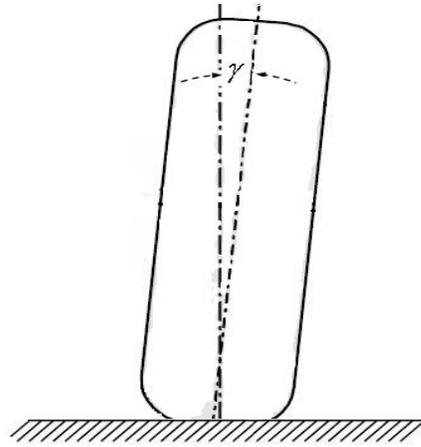


Figure 9.46: Représentation de l'angle de carossage

$\alpha_f$  et  $\alpha_r$  sont respectivement les angles de dérive ou de glissement avant et arrière, qui sont fonction de  $\delta$  appelé angle de braquage et de  $\beta$  représentant la direction du vecteur vitesse, comme le montre la figure (9.47).

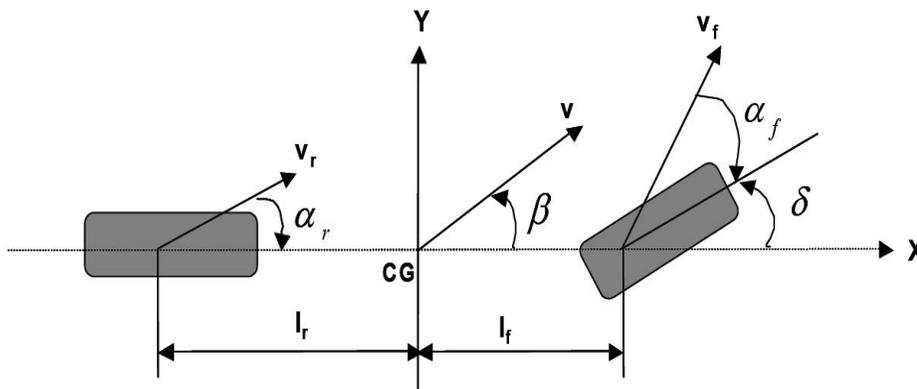


Figure 9.47: Angles de dérive dans le cas d'un modèle à deux roues

Ces angles sont calculés de la manière suivante:

$$\begin{cases} \alpha_f = \delta - \beta - \dot{\psi}r_1/v \\ \alpha_r = -\beta + \dot{\psi}r_2/v \end{cases} \quad (9.85)$$

L'angle de braquage  $\delta$  est commandé soit par le conducteur soit par un système de direction active. A partir de la mesure de l'angle au volant et du rapport liant l'angle de braquage à cet angle, on peut déduire l'angle de braquage (ce rapport est donné par le constructeur).

**Force longitudinale** La force longitudinale est la force appliquée selon l'axe  $X$  entre la surface de contact du pneu et la route. Cette force dépend du coefficient d'adhérence longitudinale  $\mu_i$  et de la force normale  $F_{ni}$ . Elle est donnée par l'expression suivante:

$$F_{xi} = \mu_i F_{ni} \quad (9.86)$$

où  $F_{nri}$  et  $F_{nfi}$  ( $i = 1..2$ ) sont respectivement, les forces normales qui agissent sur les roues arrière et avant.

Le coefficient  $\mu_i$  est fonction du glissement  $\lambda_i$  et de la vitesse du véhicule  $v$ . Il caractérise l'adhérence du contact pneu chaussée. On dit que l'adhérence est maximale lorsque ce coefficient est égal à 1. L'adhérence est nulle lorsque  $\mu_i$  tend vers 0.

Selon le modèle de Burckhardt ([Bur93], [KN05]),  $\mu_i$  est donné par l'expression suivante:

$$\mu_i = [C_1(1 - \exp(-C_2\lambda_i)) - C_3\lambda_i] \exp(-C_4\lambda_i v) \quad , \quad i = 1..2 \quad (9.87)$$

$C_1$ ,  $C_2$  et  $C_3$  définissent les caractéristiques du pneumatique. Le paramètre  $C_4$  définit les conditions d'adhérence de la route. Ces paramètres peuvent être déterminés par des mesures expérimentales.

**Définition du taux de glissement longitudinal** Le taux de glissement longitudinal  $\lambda_i$  pour la roue  $i$  peut être obtenu suivant l'expression suivante [Mam02]:

$$\begin{cases} \lambda_i = \frac{r_e w_i}{v_i} - 1 & \text{si } v_i > r_e w_i \text{ (freinage)} \\ \lambda_i = 1 - \frac{r_e w_i}{v_i} & \text{si } v_i < r_e w_i \text{ (accélération)} \end{cases} \quad (9.88)$$

$v_i$  étant la vitesse du centre de la roue,  $r_e$  est le rayon effectif de la roue: lorsqu'une force verticale est appliquée sur le pneumatique, celui-ci subit un écrasement qui réduit le rayon de la roue à  $r_e$ .

**Moment d'auto-alignement** Le point de contact de la force latérale est décalée de l'axe verticale par une distance  $\eta$  appelée chasse pneumatique et présenté sur la figure (9.48). Ce qui produit un moment d'auto-alignement qu'on note  $M_z$ .

Il est calculé de la manière suivante:

$$M_z = -\eta F_{yf} + C_z \gamma_f \quad (9.89)$$

où  $C_z$  est le coefficient de raideur radiale de pneumatique.

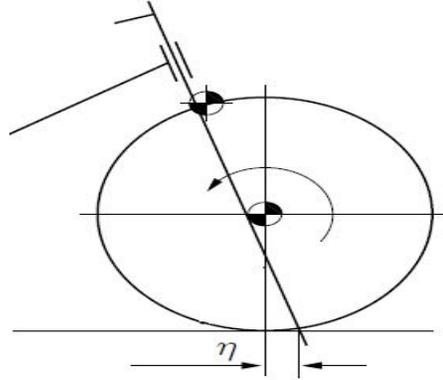


Figure 9.48: Représentation de la chasse pneumatique

**Moment de résistance au roulement** La déformation du pneumatique en contact avec la route crée une force appelée force de résistance au roulement  $F_{ri}$ .

Le moment produit est calculé par:

$$M_{ri} = -r_e(F_{ri} + F_{xi}), \quad i = 1, 2 \quad (9.90)$$

**Modèle de Pacejka** Dans le cas d'angles de dérive trop importants, la définition du comportement du pneu est souvent décrite par la formule empirique proposée par Bakker et Pacejka ([PB91], [BPL89]). Ce modèle qui tient compte de plusieurs paramètres identifiés sur la base de mesures, permet d'approcher au mieux le comportement longitudinal et latéral du pneumatique dans le cas non linéaire (voir figure (9.49)).

Cette formule est donnée par l'expression suivante:

$$F(\Omega) = f(x) + S_v \Omega. \quad (9.91)$$

avec

$$\begin{cases} f(x) = D \sin(C \arctan(Bx - E(Bx - \arctan(Bx)))) \\ x = \Omega + S_H \end{cases} \quad (9.92)$$

où  $F$  et  $\Omega$  correspondent respectivement, soit à la force longitudinale et le glissement longitudinal respectivement, soit à la force latérale et l'angle de dérive respectivement. Les différents paramètres et leurs significations intervenant dans cette formule sont:

- $B$ : pente à l'origine;
- $C$ : facteur de forme (permet d'ajuster l'allure de la courbe);
- $D$ : valeur du pic (maximum de la courbe d'adhérence);
- $E$ : facteur de courbure;

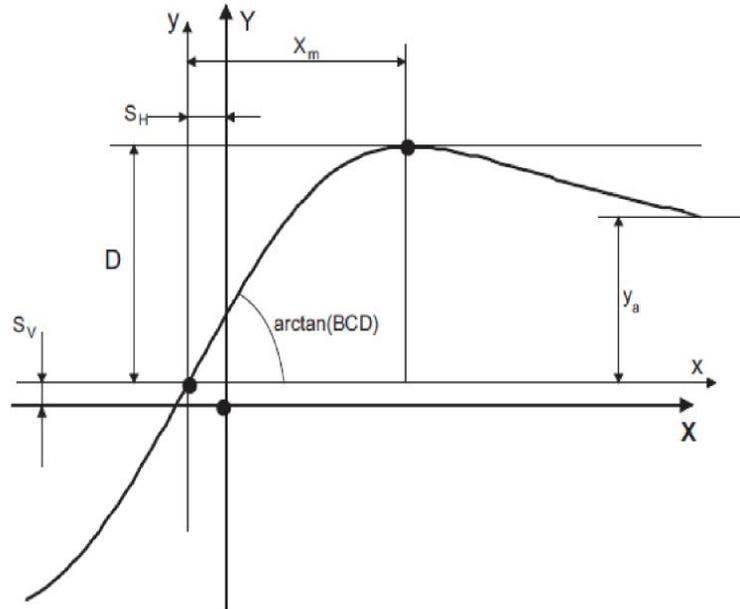


Figure 9.49: Résultat du tracé de la formule de Pacejka

- $S_H$ : est utilisé pour introduire un décalage horizontal de la courbure par rapport à l'origine;
- $S_V$ : pour un décalage vertical.

**Mouvement angulaire des roues** L'équilibre des moments pour chaque roue est donné par le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} J_f \dot{\omega}_f = M_f - r F_{xf} \\ J_r \dot{\omega}_r = -r F_{xr} \end{cases} \quad (9.93)$$

avec  $\omega_r$ ,  $\omega_f$  représentent respectivement la vitesse angulaire des roues arrière et avant,  $r$  dénote le rayon à vide de la roue,  $J_r$  et  $J_f$  sont respectivement les inerties des roues arrière et avant,  $M_f$  représente le moment qu'exerce le moteur sur la roue motrice (accélération ou freinage).

### 9.2.2.2 Couple moteur

La modélisation du moteur n'est pas présente ici. Afin de déterminer les couples moteur exercés sur chaque roue motrice, la cartographie du champs moteur peut être exploitée. En effet, à partir de mesures du régime moteur et la charge de l'accélération, nous pouvons déduire le couple moteur. La figure (9.50) montre un exemple de cartographie de champ moteur d'un véhicule (voir [Imi03], [Imi10b]).

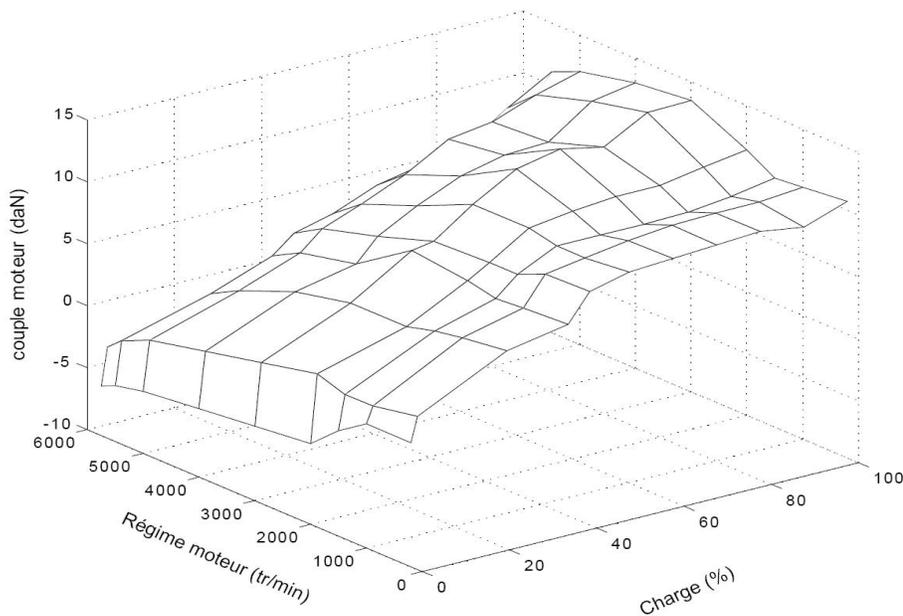


Figure 9.50: Exemple de cartographie du champ moteur

### 9.2.2.3 Couple de freinage

Les couples de freinage sont obtenus à partir de la mesure de la pression des freins.

### 9.2.2.4 Forces aérodynamiques

Le flux d'air provoque des efforts aérodynamiques qui peuvent influencer sur le comportement du véhicule dans le cas où celui-ci roule à grande vitesse ou si il est léger. La composante selon l'axe  $x$  du vecteur de forces de résistance aérodynamiques est donnée par l'expression suivante:

$$F_{air} = -\frac{1}{2}C_{ax}\rho S v_x \quad (9.94)$$

où  $C_{ax}$  représente le coefficient de résistance aérodynamique. Il dépend de la forme du véhicule et est donné par le constructeur,  $\rho$  est la densité de l'air et  $S$  représente la surface frontale du véhicule.

### 9.2.2.5 Modélisation de la chaussée

La chaussée est définie comme étant l'élévation verticale séparant la route et le repère absolu. Cette distance peut être connue par différentes méthodes déjà citées telles que: la mesure APL, la mesure GPS ou la mesure par règle. Dans nos différentes travaux, la mesure APL est considérée.

### 9.3 Instrumentation et développement d'une moto robotisée

Les deux-roues motorisés (2RM) permettent de minimiser les encombrements en ville, un gain de temps lors des déplacements ainsi qu'une réduction de la pollution (par rapport à une voiture individuelle). Sachant que le nombre de 2RM a augmenté de façon très importante, leurs usagers représentent plus de 50% du total des victimes dans les accidents. On se retrouve alors dans la nécessité de mieux comprendre leur comportement dynamique pour développer et/ou évaluer des systèmes d'aide à la conduite (alerte au conducteur), des systèmes de sécurité actifs (déclenchement de gilet gonflables, reprise de contrôle, ...etc) et aussi de mettre au point les simulateurs de conduite de 2RM et leurs modèles dynamiques sous-jacents, alors on s'est proposé de faire l'automatisation du pilotage d'un 2RM.

Il existe quelques prototypes dans le monde mais ils ne sont pas si nombreux que ça. On note cependant deux références qu'on juge les plus intéressantes, à savoir la moto sans pilote réalisée par le TECHNION de l'université de Haifa, Israël. Partant d'un véhicule de type scooter, ils ont automatisé les commandes mais le pilotage se fait à distance via une radiocommande qui donne le rayon de courbure ainsi que la vitesse.

Le second prototype est « GhostRider » de la Blue Team qui a été conçu pour le DARPA Challenge [YSZ<sup>+</sup>08]. C'est un projet de l'armée Américaine où une moto est totalement automatisée avec de gros moyens de calculs, à savoir pas moins de 6 processeurs à 1Ghz. Ce prototype peut exécuter le suivi de trajectoires.

La moto que nous utilisons, est de type « Aprilia Mana 850 » de la firme Italienne PIAGGI, représentée sur la figure 9.51. Elle est équipée d'une transmission automatique, ce qui simplifie une partie de la commande. Cette moto a une puissance de 76 ch à 8000tr/min, largement suffisante pour nos travaux. Elle peut être configurée selon plusieurs modes de conduite, en particulier, le mode « Autodrive » dans lequel les accélérations sont linéaires. Dans la suite, nous présentons les modifications effectuées sur cette moto ainsi que son instrumentation électronique. Ces modifications sont faites sur le châssis, sur l'automatisation des commandes et sur son instrumentation.

L'architecture globale de contrôle/commande ainsi qu'un procédé expérimental de mesure de la position du centre de gravité par pesage du véhicule ont été réalisés et largement décrits dans le papier présenté lors de la conférence Wosspa'11 [KBIE11a]. La connaissance de la position exacte du centre de gravité sera d'une grande importance pour la suite des travaux.



Figure 9.51: Aprilia Mana 850 après modifications

### 9.3.1 Modification effectuées sur la moto

Comme expliqué ci-dessus, nous présentons ici les modifications effectuées sur la moto pour permettre de rendre sa conduite autonome.

#### 9.3.1.1 Modifications sur le châssis

La structure de la moto a été modifiée en lui ajoutant deux roues latérales comme illustrée sur la figure 9.52.



Figure 9.52: Aprilia Mana 850 avec roues latérales

Nous remarquons que les deux roues ne touchent pas le sol et qu'elles sont montées sur des amortisseurs afin d'amortir les chocs en cas de chute. La figure 9.52 montre aussi que

la plage dans laquelle varie l'angle de roulis est théoriquement comprise entre  $\pm 14.8^\circ$ , ce qui représente une information importante lors de la phase de modélisation.

### 9.3.1.2 Automatisation des commandes

Si la moto avait un pilote celui ci la contrôlera en agissant essentiellement sur l'accélérateur, sur les deux freins avant/arrière ainsi que sur le couple de braquage.

C'est donc ces commandes là que nous devons rendre autonomes. Commençons par le braquage. Le guidon a été enlevé et remplacé par un moteur fixé directement sur l'axe de braquage, comme le montre la figure 9.53.



Figure 9.53: Moteur Harmonic Drive

Pour commander ce moteur, une carte a été utilisée. Elle peut communiquer en *RS232* et en *CANOpen*, qui est plus intéressant dans la mesure où le débit de communication peut atteindre  $1Mb/s$ , et aussi par le fait que plusieurs systèmes peuvent être montés sur le même bus, ce qui réduit fortement les câblages.

Ensuite les commandes des freins avant/arrière ainsi que l'accélérateur ont été montées chacune sur un moteur pas à pas linéaire.

Pour que la moto puisse se stabiliser, il lui faut des capteurs proprioceptifs lui permettant de déterminer sa position et son attitude dans l'espace. Les capteurs que nous avons sélectionnés sont :

- Centrale inertielle MTi de XSENS placée sous la selle
- Deux capteurs à effet Hall sont montés chacun sur l'une des roues afin de mesurer la vitesse individuelle de chacune des roues et en déduire la vitesse globale de la moto ainsi que le glissement qui sera un des paramètres importants dans le modèle dynamique.

## 9.4 Développement d'outils pour le contrôle de trajectoires

Des méthodes de contrôle robuste sont développées afin de contrôler la trajectoire de la moto. L'entrée du contrôleur  $u$  est l'angle de braquage alors que la sortie à commander

est l'angle de roulis. Pour se faire un modèle réduit a été utilisé afin de stabiliser la moto quand elle est à l'arrêt (vitesse longitudinale égale à zéro). Ce modèle est représenté sur la figure 9.54.

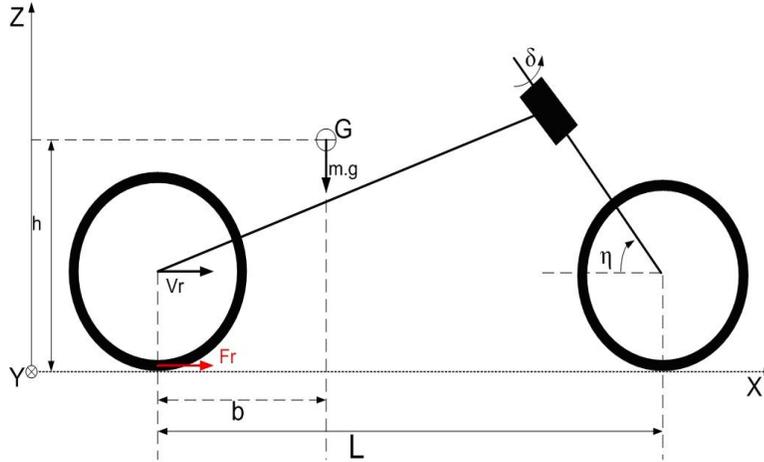


Figure 9.54: Modèle de la mtoto automatisée

Les paramètres du modèle utilisés sont:

$m$ : masse totale

$L$ : distance entre les deux roues

$h$ : hauteur du centre de gravité

$b$ : distance entre la roue arrière et le centre de gravité

$R$ : rayon de courbure

$\theta$ : angle de roulis

$\delta$ : angle de braquage

$\beta$ : angle de direction

$\Delta$ : angle de chasse

$\sigma$ : trajectoire

$\eta$ : angle de carossage

$v_r$ : vitesse de la roue arrière

$F_r$ : force longitudinale arrière

$w_\sigma$ : vitesse désirée

L'équation dynamique est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = w_\sigma = \frac{\sin \eta}{L} \dot{\delta} \\ \ddot{\theta} = \frac{g \sin \eta}{Lh} \sin \theta + \left( \frac{b \Delta \sin^2 \eta}{hl} \cos \theta \right) \delta \end{cases} \quad (9.95)$$

Le contrôleur est basé sur les modes glissants. En réécrivant le système 9.95 sous forme d'état, on obtient:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = L \sin x_1 + (C \cos x_1)u \\ y = x_1 = \theta \end{cases} \quad (9.96)$$

où  $L = \frac{g \sin \eta}{Lh}$ ,  $C = \frac{b\Delta \sin^2 \eta}{hL}$  et  $u = \delta$ .

La surface de glissement est choisi comme suit:

$$S = \dot{e} + \lambda e \quad (9.97)$$

où  $\dot{e} = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1$  est la dynamique de l'erreur sur l'angle de roulis,  $\dot{x}_{1d}$  est la vitesse désirée de  $x_1$ ,  $e = x_{1d} - x_1$  représente l'erreur et  $\lambda$  est un terme d'adaptation.

En dérivant cette surface de glissement, le vecteur de contrôle équivalent est calculé par:

$$u_{eq} = \frac{1}{C \cos y} (\lambda \dot{y} + L \sin y) \quad (9.98)$$

Le contrôleur est finalement obtenu par:

$$u = u_{eq} + K \text{sign}(e) \quad (9.99)$$

où  $K$  est le gain du contrôleur.

## 9.5 Conclusion

Même si cet axe de recherche est tout récent, comparé à celui où le PL est bien impliqué, les résultats déjà réalisés sont très encourageant. En effet, après un travail de compréhension et d'étude des différents travaux déjà existants traitant ce type de véhicule à 2 roues motorisés, nous avons développé un modèle dynamique qui correspond mieux à l'application que nous envisageons de réaliser dans nos recherches, à savoir, la conception d'une moto robotisée. Pour ce faire, nous avons présenté dans ce chapitre, l'instrumentation de la moto ainsi que les premiers résultats relatif au contrôle de sa trajectoire. Le contrôleur est basé sur une méthode robuste utilisant les modes glissants.

Cependant, beaucoup de travail reste à réaliser, notamment sur la partie contrôle où les méthodes déjà développées doivent être améliorées et validées par des expérimentations avec la moto instrumentée. Nous sommes également en train de travailler sur l'utilisation d'estimateurs afin de reconstruire les états non mesurées de la moto et de développer des différentiateurs qui nous permettront de réaliser une dérivation numérique robuste.

## **Partie III**

# **Liste des productions**

Le bilan général de mes productions en publications et logiciels est le suivant:

- 4 logiciels ont été réalisés et validés,
- 1 ouvrage individuel publié en 2010 et 1 ouvrage collectif publié en 2011,
- 10 articles de revues à comité de lecture publiés, 3 articles de revue acceptés,
- 4 articles de revue à comité de lecture en cours de révision,
- 46 articles dans des conférences nationales et internationales à comité de lecture et actes,
- 3 articles soumis à des conférences nationales et internationales,
- 1 article dans une revue technico commercial,
- 4 articles sans actes,
- 4 séminaires internationaux
- 20 rapports de recherches.



---

## Chapitre 10

# Liste des logiciels

---

Dans la cadre de mes travaux de recherche, des logiciels sont réalisés et validés par simulation et par divers experimentations.

- Logiciel de « *Prédiction de renversement et alerte* » validé par des expérimentations réalisées avec un tracteur instrumenté sur le site de la Valbonne de Renault Trucks.
- Logiciel de « *Pesage embarqué de PL* » validé par différentes expérimentations.
- Logiciel « *EvolvTraffic* » de gestion de trafic réalisé en collaboration avec l'Université UCD de Dublin.
- Contribution à la réalisation du logiciel « *ALERTINFRAPL* » consacré à la détection des points noirs de l'infrastructure.



---

## Chapitre 11

# Publications et communications

---

### 11.1 Ouvrages

1. **H. Imine**, “ *Observation d’états d’un véhicule pour l’estimation du profil dans les traces de roulement*”, Éditions Universitaires Européennes, Juillet 2010.
2. **H. Imine**, L. Fridman, H. Shraim and M. Djemai, "*Sliding mode based analysis and identification of vehicle dynamics*", Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 414, Springer Verlag, Juillet 2011.

### 11.2 Articles dans des revues à comité de lecture

1. **H. Imine**, N. K. M’Sirdi and Y. Delanne, "*Adaptive Observers and Estimation of the Road Profile*", SAE Transactions 2003, International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, Volume: 112, Number 6, pp. 1312-1317, September 2003.
2. **H. Imine**, N. K. M’Sirdi and Y. Delanne, "*Sliding Mode Observers for Systems with Unknown Inputs: Application to estimate the Road Profile*", Proceedings of the I MECH E Part D Journal of Automobile Engineering, Volume: 219, Number 8, pp. 989-997, August 2005.
3. V. Dolcemascolo, B. Jacob, M. Gothié and **H. Imine**, "*Influence de l’infrastructure sur l’insécurité routière des poids lourds* ", Revue Générale des Routes, RGRA N°842, dossier: Sécurité et Exploitation, pp. 28-32, Septembre 2005.
4. **H. Imine**, Y. Delanne and N. K. M’Sirdi, "*Road Profiles Inputs to evaluate loads on the wheels*", IAVSD, International Journal of Vehicle System Dynamics, Volume 43, pp. 359-369, Supplement, November 2005.
5. **H. Imine**, Y. Delanne and N. K. M’Sirdi, "*Road Profiles Inputs Estimation in Vehicle Dynamics Simulation*", IAVSD, International Journal of Vehicle System Dynamics, Volume 44, N°4, pp. 285-303, April 2006.

6. **H. Imine** and V. Dolcemascolo, "*Rollover risk prediction of Heavy Vehicle in interaction with infrastructure*", IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2007, Vol. 14, No.3 pp. 294-307.
7. **H. Imine** and V. Dolcemascolo, "*Sliding Mode observers to heavy vehicle vertical forces estimation*", IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2008, Vol. 15, No.1 pp. 53-64.
8. **H. Imine** and L. Fridman, "*Road profile estimation in heavy vehicle dynamics simulation*", IJVD, International Journal of Vehicle Design, 2008, Vol. 47, Nos. 1/2/3/4, pp. 234-249.
9. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Robust observation of tractor-trailer vertical forces using model inverse and numerical differentiation*", International Journal of Materials and Manufacturing, vol. 3 no. 1 pp. 278-289, August 2010.
10. **H. Imine** and T. Madani, "*Sliding mode control for automated lane guidance of heavy vehicle*", International Journal of Robust and Nonlinear Control, published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI: 10.1002/rnc.1818, Aout 2011.
11. H. Shraim, **H. Imine** and L. Fridman, "*Estimation and Analysis of the Tire Pressure Effects on the behavior of the Vehicle Center of Gravity*", accepté à IJVD, International Journal of Vehicle Design, special issue on "Variable Structure System in automotive application", Juillet 2011.
12. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Heavy duty vehicle tyre forces estimation using variable gain sliding mode observer*", accepté à IJVD, International Journal of Vehicle Design, special issue "Variable Structure System in automotive application", Juillet 2011.
13. **H. Imine**, L. Fridman and T. Madani, "*Steering Control for rollover avoidance of heavy vehicle*", accepté à IEEE Transactions on Vehicular Technology, Février 2012.

### 11.3 Articles soumis à des revues à comité de lecture

1. O. Khemoudj, **H. Imine**, M. Djemai and K. Busawon, "*Robust observation of tyre forces for heavy duty vehicles*", en révision à IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems.
2. **H. Imine**, L. Fridman and T. Madani, "*Identification of vehicle parameters and estimation of vertical forces*", en révision à IEEE/ASME Transactions on Mechatronics.

3. **H. Imine**, A. Benallegue, T. Madani and S. Srairi, “*Rollover risk prediction of an instrumented heavy vehicle using high order sliding mode observer*”, en révision à Control Engineering Practice.
4. **H. Imine**, H. Shraim and L. Fridman, “*Identification of heavy vehicle suspension parameters and estimation of vertical forces*”, en révision à Control Engineering Practice, special issue: “Variable Structure Systems Techniques in Applications”.

## 11.4 Communications à des congrès à comité de lecture et actes

1. **H. Imine**, N. K. M’Sirdi, Y. Delanne and L. Laval, “*Observers with unknown inputs for Estimation of the Road Profile*”, IEEE International Conference on Advanced Robotics, ICAR’01, pp. 591-597, 22-25 Août 2001, Budapest, Hungary.
2. **H. Imine**, L. Laval, N. K. M’Sirdi and Y. Delanne, “*Sliding Mode Observers with unknown inputs to estimate the Road Profile*”, International Conference on Control and Applications, IASTED’02, 20-22 Mai, 2002, Cancun, Mexico.
3. **H. Imine**, N. K. M’Sirdi, Y. Delanne et L. Laval, “*Observateurs à entrées inconnues par mode glissant appliqués à l’estimation du profil de route*”, IEEE Conférence Internationale Francophone d’Automatique, CIFA’02, pp. 883-888, 8-10 Juillet 2002, Nantes, France.
4. **H. Imine**, N. K. M’Sirdi and Y. Delanne, “*Adaptive Observers and Estimation of the Road Profile*”, World Automotive Congress, SAE’03, pp.175-180, March 3-5, 2003, Detroit, USA.
5. **H. Imine**, Y. Delanne and N. K. M’Sirdi, “*Road Profiles Inputs for Vehicle Dynamics Simulation*”, Advanced Vehicle Control, AVEC’04, pp.381-386, August 23-27, 2004, Arnhem, Netherlands.
6. **H. Imine**, Y. Delanne and N. K. M’Sirdi, “*Road Profiles Inputs to evaluate loads on the wheels*”, Tyre Models for Vehicle Dynamics Analysis, TMVDA’04, August 30-31, 2004, Vienna, Austria.
7. R. Merzouki, M. Bouteldja, **H. Imine** and J. C. Cadiou, “*Friction Force Estimation and Adaptive Control for Tire Road Contact*”, IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS’04, pp. 2434-2439, September 28, October 02, 2004, Sendai, Japan.
8. **H. Imine**, H. Rabhi, N. K. M’Sirdi and Y. Delanne, “*Observers with Unknown Inputs to Estimate Contact Forces and Road Profile*”, International Conference on

- Advances in Vehicle Control and Safety, AVCS'04, October 28-31 2004, Genoa, Italy.
9. **H. Imine**, Y. Delanne and N. K. M'Sirdi, "*Estimation et quantification des entrées de profil à l'aide d'observateurs triangulaires à modes glissants*", IEEE Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'04, pp.109-114, 22-24 Novembre, 2004, Douz, Tunisie.
  10. **H. Imine** and Y. Delanne, "*Triangular Observers for Road Profiles Inputs estimation and vehicle dynamics analysis*" ICRA'05, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4762-4767, April 18-22, 2005, Barcelona, Spain.
  11. **H. Imine**, V. Dolcemascolo and B. Jacob, "*Influence of the road profile on wheel and vehicle loads estimation* ", 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, ISHVWD, 18-22 June 2006, Pennsylvania, USA.
  12. **H. Imine** and V. Dolcemascolo, "*Warning System to prevent Rollover of heavy Vehicles* ", 9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions, ISHVWD, 18-22 June 2006, Pennsylvania, USA.
  13. **H. Imine** and V. Dolcemascolo, "*Vertical tyre forces estimation to calculate the Rollover risk of heavy Vehicles*", FISITA'06, World Automotive Congress, F2006V078, 22-27 October 2006, Yokohama, Japan.
  14. **H. Imine** et V. Dolcemascolo, "*Estimation des Forces Verticales d'un Poids Lourd utilisant les Observateurs à Modes Glissants d'ordre 2*", 4eme Journées des Sciences de l'Ingénieur, JSI'06, pp.368-373, 05-06 Décembre 2006, Marne la Vallée, France.
  15. M. Bouteldja, A. Koita, **H. Imine** et V. Dolcemascolo, "*Systèmes intelligents d'aide à la conduite des poids lourds : Renversement et mise en portefeuille*", 4eme Journées des Sciences de l'Ingénieur, JSI'06, pp.386-391, 05 au 06 Décembre 2006, Marne la Vallée, France.
  16. **H. Imine**, "*Heavy vehicle modelling, evaluation and prevention of rollover*", EC-TRI, Young researcher seminar, Brno, Czech Republic, 28th-30th May 2007.
  17. J. Dakhllallah, **H. Imine**, Y. Sellami and D. Bellot, "*Heavy Vehicle State Estimation and Rollover Risk Evaluation Using Kalman Filter and Sliding Mode Observer* ", ECC'07, IEEE European Control Conference, pp.3444-3449, 02-05 July 2007, Kos, Greece.
  18. **H. Imine** and L. Fridman, "*Estimation of the Unknown Inputs and Vertical Forces of the Heavy Vehicle Via Higher Order Sliding Mode Observer*", IV'07, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.949-954, 13-15 July 2007, Istanbul, Turkey.
  19. **H. Imine**, S. Srairi and T. Madani, "*Experimental validation of rollover risk prediction of heavy vehicles*", TRA'08, Transport Research Arena, 21-25 April 2008,

Ljubljana, Slovenia.

20. Y. Sellami and **H. Imine**, "*Probabilistic approach to rollover risk analysis of heavy vehicles*", TRA'08 , Transport Research Arena, 21- 25 April 2008, Ljubljana, Slovenia.
21. Y. Sellami, **H. Imine**, F. Bernardin and J. C. Cadiou, "*Probabilistic detection of rollover risk of heavy vehicles*", World Automotive Congress, SAE'08, Detroit, USA, Avril 2008.
22. **H. Imine**, S. Srairi, D. Gil and J. Receveur, '*Heavy vehicle, Vehicle Management Center and Infrastructure interactivity to manage the access to infrastructure*', ICHV'08, International Conference on Heavy Vehicle, pp.103-109, 19-22 May, 2008, Paris, France.
23. Y. Sellami, **H. Imine**, F. Bernardin, J. C. Cadiou and B. Jacob, "*Rollover risk prevention of heavy vehicles by reliability-based analysis*", ICHV'08, International Conference on Heavy Vehicle, pp.199-208, 19-22 May, 2008, Paris, France.
24. **H. Imine**, S. Srairi et T. Madani '*Observateurs à modes glissants pour l'étude de renversement d'un poids lourd: résultats expérimentaux*', CIFA'08, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 03-05 Septembre, 2008, Bucarest, Roumanie.
25. **H. Imine**, J. Dakhllalah and Y. Sellami, '*Validation Expérimentale de l'Identification de la Hauteur du Centre de Gravité du Poids Lourd et de l'Estimation du Risque de renversement*', CIFA'08, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 03-05 Septembre, 2008, Bucarest, Roumanie.
26. Y. Sellami, **H. Imine**, J. C . Caidou et A. Hadri, '*Evaluation du risque de renversement de poids lourds par indice de fiabilité*', CIFA'08, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, 03-05 Septembre, 2008, Bucarest, Roumanie.
27. **H. Imine**, T. Madani and S. Srairi, '*High order Sliding mode observers to estimate vertical forces: experimental results*', ITSC'08, IEEE Intelligent Transportation Systems Society, pp.523-527, October 12-15, 2008, Beijing, China.
28. **H. Imine**, A. Benallegue, T. Madani and S. Srairi, '*Rollover risk prediction of an instrumented heavy vehicle using high order sliding mode observer*', ICRA'09, IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.64-69, May 12-17, 2009, Kobe, Japan.
29. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Unknown input observation via sliding modes: application to vehicle contact forces*", IEEE Multi-conference on Systems and Control 2009, Saint Petersburg, Russia, pp. 1720-1725, July 8-10, 2009.
30. **H. Imine**, A. Benallegue and L. Fridman, '*Experimental validation of unknown*

- Inputs estimation of heavy vehicle Via High Order Sliding Mode Observer*", 12th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, CTS'09, pp.413-419, 2-4 September, 2009, California, USA.
31. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Estimation of the tyre-forces and Control theory approach applied for monitoring heavy vehicle*", HVTT11, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 15-17 March 2010, Melbourne, Australia.
  32. **H. Imine**, T. Madani and A. Benallegue, "*Rollover avoidance of Heavy Vehicles Using Sliding Mode Observer-Controller*", HVTT11, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 15-17 March 2010, Melbourne, Australia.
  33. **H. Imine**, "*Estimation of unknown inputs of heavy vehicle: experimental validation*", HVTT'10, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, 15-17 March 2010, Melbourne, Australia.
  34. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Robust observation of tractor-trailer vertical forces using model inverse and numerical differentiation*", SAE, world automotive congress 13-15 Avril 2010, Detroit, USA.
  35. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Nouvelle Approche pour l'estimation des forces d'impact de poids lourds*", PRAC, Conférence sécurité routière Prévention des Risques et Aides à la Conduite 04-05 Mai 2010, Paris, France.
  36. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Estimation des forces d'impact des véhicules poids lourds par différentiateurs exacts et modèle inverse*", CIFA, Conférence internationale francophone d'automatique, 2-6 juin 2010, Nancy, France
  37. **H. Imine**, T. Madani and A. Benallegue, "*Steering control for heavy vehicle lane departure avoidance*", 11th International Workshop on Variable Structure Systems, VSS10, pp.522-527, 26-28 June 2010, Mexico city.
  38. O. Khemoudj, **H. Imine** and M. Djemai, "*Variable gain sliding mode observer for heavy duty vehicle tyre forces estimation*", 11th International Workshop on Variable Structure Systems, VSS10, 26-28 June 2010, Mexico city.
  39. L. Nehaoua, A. Khettat, H. Arioui, **H. Imine** and S. Espié, "*Rider Steer Torque Estimation for Motorcycle Riding Simulator*", IFAC Symposium on Mechatronic Systems, September 13-15, 2010, Cambridge, Massachusetts, USA.
  40. **H. Imine**, "*Sliding-Mode Controller for heavy vehicle lane departure avoidance*", International congress of heavy vehicles, road trains and urban transport, Minsk, Belarusse, Octobre 2010.
  41. **H. Imine** and O. Khemoudj, "*Dynamic parameters identification and estimation*

- of the vertical forces of heavy vehicle* “, SAE World congress on automotive, Avril 2011, Detroit, USA.
42. A. Khettat, S. Bouaziz, **H. Imine** and S. Espié, “*Two-wheeled motorcycle automation: System approach*”, WoSSPA2011, 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications, pp.47-50, May 09-11, 2011, Tipaza, Algeria.
  43. **H. Imine**, “*Identification of heavy vehicle parameters and steering control for rollover avoidance*”, IAVSD, International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks, 14-19 Aout 2011, Manchester, UK.
  44. **H. Imine** and T. Madani, “*Sliding mode control for heavy vehicle lane departure avoidance*”, ICCA’11, IEEE International Conference on Control & Automation, pp.372-377, December 19- 21, 2011, Santiago, Chile.
  45. **H. Imine**, L. Fridman and H. Shraim, “*Identification of heavy vehicle suspension parameters and estimation of vertical forces*”, 12th International Workshop on Variable Structure Systems, VSS’12, pp.63-69, January 12-14, 2012, Bombay, India.
  46. **H. Imine**, M. Djemai, O. Khemoudj and A. Germanchev, “*Sliding mode observers for tyre vertical forces estimation: experimental results using ALF*”, accepté à HVTT’12, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology, September 16-19, 2012, Stockholm, Sweden.

## 11.5 Communications soumises à des congrès à comité de lecture et actes

1. N. Hamadi, **H. Imine** and D. Ameddah, “*Outils génériques pour le développement d’un modèle de véhicule articulé tout terrain*”, ICIEM’12, second International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing, May 06-07, 2012, Batna, Algérie.
2. N. Khraief, **H. Imine**, “*Rollover risk evaluation of heavy vehicle via bifurcation analysis*”, AHVEC, Advances in Heavy Vehicle Safety, Energy Efficiency, and Controls, workshop in Intelligent Vehicles Symposium (IV’12), June 3-7, 2012, Alcalá de Henares, Spain.
3. A. Khettat, S. Bouaziz, **H. Imine** and S. Espié, “*Two-wheeled motorcycle control based on roll stabilization at zero velocity*”, soumis à AIM’12, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics July 11-14, 2012, KaoHsiung, Taiwan.

## 11.6 Revues technico-professionnelles

1. **H. Imine** et Y. Delanne "Relevé du profil de la route", Congrès SIA'05, Dynamique du Véhicule et Confort de Suspension, 14- 15 Juin 2005, Lyon, France.

## 11.7 Communications sans actes

1. N. K. M'Sirdi et **H. Imine**, "Utilisation d'observateurs à modes glissants pour l'estimation du profil de route", Journées Automatique et Automobile, JAA'03, 05 au 06 Novembre 2003, Bordeaux, France.
2. **H. Imine**, "Utilisation d'observateurs à modes glissants pour l'estimation du profil de route", 16èmes Journées des Jeunes Chercheurs en Robotique, JJCR, 16-17 Septembre 2002, Lyon, France.
3. **H. Imine**, "Impact des Poids Lourds actuels et futurs sur la sécurité routière", Journées Techniques Routes, JTR, 02-03 Février 2010, Nantes, France.
4. O. Khemoudj, **H. Imine** et M. Djemaï, "Développement d'une méthode de pesage embarqué pour poids lourd", Journées Automatique et Automobile du GdR MACS CNRS, GTAA, Amiens, 07-08 Décembre, 2010.

## 11.8 Séminaires

1. **H. Imine**, "Advances in heavy vehicle dynamics, safety and control", Université de Lancaster, Grande Bretagne, Novembre 2011.
2. **H. Imine**, "Bridge management application", Final seminar, FEHRL (Forum Européen des Laboratoires Nationaux de Recherche Routière), Bruxelles, Belgique, Juin 2009.
3. **H. Imine**, "Driver support warning: rollover application", Final seminar, FEHRL, Bruxelles, Belgique, Juin 2009.
4. **H. Imine**, "Modélisation, Estimation et Commande des véhicules", Université de Batna, Algérie, Mai 2009.

## 11.9 Rapports de recherche

1. **H. Imine** et V. Dolcemascolo, "Développement fonctionnel et étude de faisabilité", Rapport de recherche, Projet VIF, Juin 2006.

2. **H. Imine**, “*Analyse Fonctionnelle du Système Temps Réel de Prédiction de Risque de Renversement d’un Poids Lourd*”, rapport projet VIF2, Janvier 2007.
3. **H. Imine**, V. Dolcemascolo, S. Verger, J. Receveur et M. Hammer, “*Spécifications détaillées des sous ensembles et leurs interfaces, Plan d’expérimentations des sous ensembles*”, livrable de la tâche 3 du projet VIF2, Avril 2007.
4. T. Madani, A. Benallegue et **H. Imine**, “*Etude de Sensibilité d’un Modèle de Renversement d’un Essieu de Poids Lourd vis-à-vis des Perturbations de Mesure*”, rapport projet VIF2, Mai 2007.
5. T. Madani, A. Benallegue et **H. Imine**, “*Plan d’expérience, instrumentation, traitement des signaux et vérification du système au laboratoire*”, rapport projet VIF2, Juin 2007.
6. **H. Imine**, C. Eichhhorn, L. Sjögren, U. Hammarström, M. Ögren, A. Ihs and F. Bode, “*Tools, methods and data for vehicle/infrastructure interaction and traffic measurement*”, livrable D2.4, projet HeavyRoute, Septembre 2007.
7. **H. Imine**, “*Vehicle characteristics governing their safety*”, livrable D2.3, projet HeavyRoute, Janvier 2008.
8. **H. Imine**, S. Verger, J. Receveur et M. Hammer, “*Intégration des composants du système VIF : Résultat des tests avant intégration*”, livrable de la tâche 4, projet VIF2, Avril 2008.
9. **H. Imine**, “*Rollover warning application*”, contribution au livrable de la tâche 3.1, projet Heavyroute, Mai 2008.
10. **H. Imine**, J. Receveur, S. Verger, C. Romeggio, M. Hammer, S. Srairi, T. Madani et A. Benallegue, “*Plan d’expérience, Tests fonctionnels Plan d’expérimentation Résultats*”, livrable tâche 6, projet VIF2, Juin 2008.
11. **H. Imine**, M. Hannachi, C. Caprani and E. O’Brien, “*EvolveTraffic: A Traffic Microsimulation Model for Bridge Loading*”, Manuel d’utilisation du logiciel de microsimulation du trafic, projet Heavyroute, Aout 2008.
12. S. Forkert, C. Eichhor, **H. Imine**, V. Cerezo, M. Hannachi, A. Ihs, L. Sjögren, K. Weever, “*Design and specification of route guidance, driving support and critical infrastructure management*”, contribution au livrable de la tâche 3.2, projet Heavyroute, Septembre 2008.
13. A. Ujj, A. Ihs, L. Sjögren, **H. Imine**, M. Hannachi, M. Arroyo, V. Cerezo, C. Eichhorn, F. Bode, D. Omasits, S. Römer, S. Deix and S. Forkert, “*Test environment description and specifications*”, contribution au livrable de la tâche 5.1 du Projet HEAVYROUTE, Octobre 2008.

14. **H. Imine**, M. Hannachi, E. O'brien, D. Siegert, M. Arroyo, L. Sjögren, S. Deix, S. Erlingsson, L. Wågberg and M. Ralbovský, " *Models to estimate HGV impact on infrastructure to be used in route planning*", contribution au livrable de la tâche 2.5 du Projet Heavyroute, Octobre 2008.
15. **H. Imine**, S. Verger, J. Receveur, M. Hammer et M. Menvielle " *Diffusion des résultats*", livrable tâche 7, projet VIF2, Octobre 2008.
16. **H. Imine**, A. Ihs, L. Sjögren and M. Hannachi, " *Tests and evaluations*", contribution au livrable de la tâche 5.2 du Projet Heavyroute, Novembre 2008.
17. **H. Imine**, " *Calcul de la vitesse max et alerte au renversement* ", rapport de recherche de l'OR PLINFRA, Avril 2009.
18. A. Ihs, L. Sjögren, **H. Imine**, V. Cerezo, G. Lindberg, S. Deix, S. Forkert, R. Karlsson and M. Ralbovsk, " *Final summary report*", contribution au livrable final du projet Heavyroute, Novembre 2009.
19. O. Khemoudj et **H. Imine**, " *Rapport d'expérimentation de ALF et résultats de validation*", OR PLINFRA, Mai 2010.
20. V. Cerezo, M. Bouteldja, F. Conche, G. Dupré, P. Subirats, **H. Imine** et J.F. Durand, " *Propositions d'alertes pour AlertinfraPL, Synthèse du groupe de travail*", OR PLINFRA, Aout 2010.

## **Partie IV**

# **Conclusion générale et perspectives**



---

## Chapitre 12

# Conclusion générale

---

Une synthèse de mes activités de chargé de recherche a été présentée dans ce mémoire. L'amélioration de la sécurité routière liée aux PL et aux deux roues motorisés a constitué l'objectif premier de ma recherche. Après avoir travaillé auparavant et durant 5 années (1999-2004) sur un véhicule léger, il m'a fallu lors de ma prise de poste à IFSTTAR en 2005, d'orienter ma recherche vers les systèmes dynamiques plus lourds et plus longs que sont les poids lourds. J'ai donc consacré la première année, à la compréhension de ce type de véhicule, à les distinguer des véhicules légers, pour ensuite développer différents types de modèles, allant d'un deux essieux de type tracteur, à un modèle de type tracteur-semi remorque à 5 essieux et plus.

Je me suis rendu compte que les outils et les méthodes développées durant ma thèse pouvaient bien être adaptés à ce genre de véhicule, même si les problématiques, les risques d'accidents ainsi que les conséquences sur les usagers et sur les infrastructures ne sont pas du même ordre.

C'est sur ce constat que je me suis intéressé à développer des systèmes d'aide à la conduite pour réduire les risques d'accident. Pour y arriver, la démarche consiste à observer et à estimer la dynamique du PL, à identifier ses paramètres les plus influents, à prédire le risque d'accident et enfin à contrôler sa trajectoire par des commandes actives.

Etant donné qu'il existe différentes classes et types de PL, nous nous sommes basés sur les études d'accidentologies qui sont régulièrement menées par l'observatoire nationale interministériel pour la sécurité routière (ONISR), et qui montrent que le tracteur semi-remorque représente le véhicule le plus répandu sur les routes. En même temps, ces études montrent que l'accident où le PL est impliqué et qui cause le plus de dégâts matériels et humains est bien le renversement. A partir de là, nous avons donc logiquement doublé d'efforts et développé des outils et des méthodes afin d'éviter ce genre d'accidents, à ce type de PL. Dans ce mémoire, nous avons présenté le système que nous avons développé et qui permet de prédire le renversement du PL. Son efficacité a été démontrée, en temps réel

avec un tracteur instrumenté, lors des expérimentations effectuées sur le site de Renault Trucks à la Valbonne. En effet, le renversement du PL a été bien prédit et une alarme a été envoyée au chauffeur, 3s avant le risque afin qu'il ait suffisamment de temps pour réduire sa vitesse.

Nous nous sommes aussi intéressés à étudier d'autres risques tels que la sortie de voie ou la collision et nous avons montré que les solutions proposées sont prometteuses d'après les résultats présentés dans ce mémoire.

Nous avons également montré que la charge et le poids du PL constituent un certain nombre de risques et d'endommagement de l'infrastructure. Nos travaux dans cette thématique nous ont conduit à trouver des solutions afin de mieux estimer les forces d'impact des PL sur la chaussée et de les contrôler afin de réduire leurs effets et éviter des accidents. Les résultats de validation effectués sur un banc d'essai du Laboratoire ARRB à Melbourne, ont montré que les méthodes ainsi développées sont prometteuses et peuvent estimer la force d'impact avec une erreur inférieure à 10%. Cette estimation de forces a été renforcée par une identification paramétrique de qualité. En effet, nous avons montré que l'identification des paramètres tels que les masses non suspendues et les raideurs de suspension ont permis de mieux estimer les forces verticales. Comme application, nous avons développé une première approche de contrôle qui permet de stabiliser ces forces d'impact et ainsi éviter le renversement du véhicule.

La création de l'UMR LEPSIS en Janvier 2009, m'a permis de débiter une nouvelle activité de recherche autour de la dynamique des deux roues motorisés. J'ai depuis, avancé dans la compréhension de ce genre de véhicule qui constitue quelques spécificités que nous avons montrées dans ce mémoire. Un état de l'art détaillé a également été présenté. Nous avons développé des modèles dynamiques de moto, identifié quelques paramètres et développé des méthodes afin de contrôler la trajectoire de la moto et éviter l'accident.

Même si beaucoup de travail reste à faire, nous avons vu que les premiers résultats présentés dans ce mémoire sont très encourageants.

Tous ces travaux ont été réalisés dans le cadre de projets de recherche financés, soit en interne dans le cadre d'opérations de recherche (TRUCKS, PLINFRA), soit par l'ANR, PREDIT soutenus par les pôles de compétitivités ou encore par la commission européenne dans le cadre du programme PCRD.

Les résultats obtenus ont fait l'objet de plusieurs publications:

- 1 ouvrage individuel publié en 2010 et 1 ouvrage collectif publié en 2011,
- 10 articles de revues à comité de lecture publiés, 2 articles de revue acceptés,
- 5 articles de revue à comité de lecture en cours de révision,

- 46 articles dans des conférences nationales et internationales à comité de lecture et actes,

- 3 articles soumis à des conférences nationales et internationales,

- 1 article dans une revue technico commercial,

- 4 articles sans actes,

- 4 séminaires internationaux

- 20 rapports de recherches.

Concernant l'encadrement scientifique, j'ai participé au suivi de 2 thèses soutenues, et 3 autres en cours, j'ai encadré 3 post-doctorants et 5 stagiaires de Master2.

J'ai également assuré et ce depuis le début de ma thèse, des enseignements, d'abord en tant que vacataire, ensuite en tant qu'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à l'Université de Versailles. Depuis que je suis chercheur, j'assure assez régulièrement des vacations dans les domaines liés à l'automatique, au traitement du signal et à la dynamique du véhicule.



---

## Chapitre 13

# Perspectives

---

Nous avons vu dans ce mémoire que la sécurité routière liée aux PL et aux deux roues motorisés constitue malheureusement, encore aujourd'hui une vraie problématique. Nous avons présenté les derniers résultats issus des outils et méthodes que nous avons développés durant ces dernières années. Il reste cependant quelques points à améliorer que je vais présenter dans ce qui suit et qui rentrent dans le cadre de mon projet scientifique des prochaines années. Ce projet s'inscrit pour répondre aux différentes mutations que connaît notre laboratoire et aux différentes exigences et recommandations du ministère.

- Sur l'étude du risque et des pertes de contrôle des PL, nous avons présenté des résultats satisfaisants émanant des différentes méthodes que nous avons développées, surtout en ce qui concerne le risque de renversement. Cependant, il reste encore à améliorer les méthodes traitant les risques de collision et de sortie de voie. Les résultats obtenus issus du système de contrôle actif nous encouragent à continuer dans cette voie. Il faudra par ailleurs, élargir cette réflexion aux PL de type tracteur semi-remorque. Il sera donc question de contrôler un modèle plus complexe, le développement d'un contrôleur robuste non linéaire sera donc nécessaire.

L'identification paramétrique présentée dans ce mémoire a permis d'obtenir les raideurs de suspension ainsi que les masses non suspendues du véhicule ainsi que les perturbations. Nous avons vu que cette identification permet, d'améliorer la qualité d'estimation des forces d'impact. Dans le futur, nous allons nous intéresser à reconstituer d'autres paramètres aussi importants tels que les coefficients d'amortissements, sans pour autant complexifier le système global. Il serait intéressant pour la robustesse du système, d'identifier également les erreurs issues des capteurs. Le diagnostic et la détection des défauts dans le PL constitue donc une des principales thématiques à laquelle je voudrai m'orienter.

Nous avons vu que les méthodes développées dans ce mémoire permettent d'éviter les risques d'accidents qui sont provoqués principalement par une vitesse excessive du

chauffeur, du non respect des règles de conduite, comme par exemple un dépassement dangereux ou bien les accidents sont dus à un état dégradé de chaussée. En aucun cas, les risques étudiés sont dus à un défaut capteur. L'objectif dans le future est de développer un algorithme de détection de défauts et de diagnostique. Ceci permettra d'analyser la fiabilité des capteurs afin de prévoir des défauts et ainsi éviter les accidents.

Cette nouvelle thématique sera développée en collaboration avec le professeur R. Merzouki du laboratoire LAGIS.

- Sur le pesage dynamique et embarqué des PL, nous avons initié une méthode basée sur les systèmes hybrides et à commutation qui permet de contrôler le transfert de charge du PL et assurer ainsi sa stabilité et diminuer l'effet de charge sur l'infrastructure. Cependant, cette méthode doit être améliorée notamment, en utilisant un contrôleur plus robuste, basé sur les modes glissants par exemple. C'est un travail qui va être réalisé conjointement avec M. Djemai, professeur à l'Université de Valenciennes et N. Khraief de l'Université de Tunis.

Nous avons montré que le système poids lourd/Infrastructure est complexe et tous ses états dynamiques ne peuvent être mesurés et connus. En fonction des caractéristiques de la route, de la météo et de la vitesse du chauffeur, le système peut basculer d'un état de stabilité à un autre état à risque d'accident. Ceci constitue donc un système à structure variables ou un système hybride que nous proposons d'étudier. A travers une analyse de bifurcation, l'identification des zones à risques liés au PL sera réalisée. Une première étude a déjà été réalisée sur une classification des zones à risques d'un poids lourds à travers une analyse de bifurcation. Les résultats ont été soumis au workshop AHVEC. Nous envisageons donc d'approfondir cette approche en proposant notamment d'analyser plus de variables d'un véhicule type poids lourd semi-remorque. Nous allons nous intéresser également à une méthodologie qui permettra de considérer le système PL/infrastructure comme un système chaotique et d'appliquer ensuite des commandes appropriées pour le contrôler.

Par ailleurs, les modélisations des effets dynamiques effectuées jusqu'à maintenant ne permettent pas d'aboutir à une estimation des poids statiques avec la précision voulue. C'est pourquoi et dans le cadre d'une thèse de doctorat que nous avons soumis avec S. Seng, dans le cadre du projet Fui HPWIM, nous avons proposé d'analyser les données simulées et recueillies sur les sites d'expérimentations à l'aide des véhicules instrumentés. Les données simulées seront obtenus à l'aide de PROPSER, le logiciel de simulation d'interaction dynamique chaussée/poids lourd.

La force dynamique sera considérée comme une variable aléatoire. Cette distribution sera ensuite exploitée dans un algorithme de pesage en marche basé sur le principe du

---

maximum de vraisemblance par une approche de type EM (Espérance-Maximisation) qui sera développée dans cette thèse.

- Sur le contrôle de la dynamique deux roues motorisées, une instrumentation de la moto robotisée doit être finalisée afin de valider les modèles dynamiques et qui permettra également de valider les méthodes de contrôle. Ces dernières doivent être améliorées en introduisant des non linéarités issus du modèle plus approprié de la moto. Notre perspective de recherche porte aussi sur l'utilisation d'observateurs et estimateurs pour la reconstruction de la dynamique non mesurée de la moto et éviter par ce fait, d'utiliser d'autres capteurs qui pourraient encombrer d'avantage la moto instrumentée. Une fois le dispositif finalisé, une expérimentation sur site sera réalisée afin de valider les algorithmes développés. Il serait également intéressant de quantifier les performances de cette moto robotisée en la comparant à celles déjà existantes et que nous avons déjà citées dans ce mémoire.

- Enfin et au-delà des objectifs d'améliorer la sécurité des poids lourds et des deux roues motorisés, mes perspectives de recherche s'inscrivent autour des thématiques suivantes:

1. La compréhension et le développement d'outils pour une meilleure gestion du trafic routier. En effet, la prise en compte des deux roues motorisées ainsi que des PL dans les études du trafic routier, constitue aujourd'hui un objectif majeur, en vue d'amélioration de la circulation et de la sécurité. Mon expérience acquise pendant le projet heavyroute dans le développement du logiciel Evolvtraffic, sera mise à disposition. D'ailleurs, je fais partie au laboratoire, du comité de suivi de la thèse de S. Lancelot, qui porte sur une approche comparative de la modélisation de l'effet des poids lourds sur le trafic. Nous avons montré que nous n'avons pas pu aller jusqu'au bout de l'expérimentation effectuée sur le site de SAROT. Il serait donc intéressant à long terme, de reproduire cette expérimentation afin de tester sur route les algorithmes qui seront développés sur la gestion du trafic.

2. Contribution au développement des simulateurs: Comme mentionné précédemment, le LEPSIS travaille depuis quelques années sur les simulateurs de conduite, deux roues motorisés et véhicule automobile de type lacet. Mes perspectives à long terme, consistent à utiliser mes compétences pour améliorer les modèles dynamiques existants dans ces simulateurs pour les rendre un peu plus réalistes. Il sera également question d'identifier les paramètres dynamiques de ces modèles. L'idée est aussi de développer et d'intégrer des estimateurs et observateurs afin de reconstituer les variables difficilement mesurables tels que les couples et les forces. Mes collaborations avec H. Arioui de l'Université d'Evry, qui travaille déjà sur cette thématique, facilitera sans doutes mon initiation et mon implication dans ce domaine.

3. Eco-conduite: la gestion de la consommation des poids lourds a constitué ces dernières années un défi majeur pour les constructeurs des PL pour des raisons évidentes d'économie d'énergie mais aussi pour les pouvoirs publics pour des raisons environnementales et écologiques. En effet, une optimisation de la consommation en carburant des PL permettra de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et par la même occasion permettra une économie importante en énergie. La démarche consiste donc à développer des outils d'optimisation, sans pour autant perdre de vue l'aspect sécuritaire. Ce dernier aspect sera bien évidemment prioritaire. Des consignes de vitesse seront envoyées au chauffeur du véhicule afin qu'il adapte sa conduite. Ces consignes seront calculées en fonction des caractéristiques d'infrastructure, de trafic et de météo. Ce travail qui a déjà été initié dans le cadre du sujet 4 de l'opération de recherche PLINFRA, sera réalisé en collaboration avec L. Nouveliere de l'Université d'Evry.

Concernant mes activités d'enseignement, j'ai en cours de montage, une formation initiale avec Dr. Hacene Derafa, enseignant chercheur à l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, dans le domaine de l'automatique appliqué au véhicule.

De plus, et dans le cadre du projet DIAVOS soumis en collaboration avec l'Université de Batna en Algérie, des séminaires seront organisés et des cours seront donnés. Ils porteront sur les dernières avancées en matière de sécurité routière et de prévention d'accidents.

---

# Références bibliographiques

---

- [ACRM04] A. AKHENAK, M. CHADLI, J. RAGOT, AND D. MAQUIN. Estimation of state and unknown inputs of a non linear system represented by a multiple model. In “IFAC Automation in Mining, Mineral and Metal Processing”, pages 385–388, Nancy, France (2004). (Cité page 62.)
- [ANBE11] H. ARIOUI, L. NEHAOUA, R. BERTIN, AND S. ESPIÉ. From design to experiments of a 2 dof vehicle driving simulator. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **60**(2), 357–368 (2011). (Cité page 105.)
- [ANH<sup>+</sup>10] H. ARIOUI, L. NEHAOUA, S. HIMA, N. SÉGUY, AND S. ESPIÉ. Mechatronics, design and modeling of a motorcycle riding simulator. *IEEE Transactions on Mechatronics* **15**(5), 805–818 (Octobre 2010). (Cité page 105.)
- [AO99] J. ACKERMANN AND D. ODENTHAL. Damping of vehicle roll dynamics by speed-scheduled active steering. In “European Control Conference”, Karlsruhe, Germany (1999). (Cité pages 51, 62 et 85.)
- [AO03] T. ACARMAN AND U. OZGUNER. Rollover prevention for heavy trucks using frequency shaped sliding mode control. In “IEEE Conf. Control Applications”, volume 1, pages 7–12 (23–25 June 2003). (Cité page 62.)
- [AOB99] J. ACKERMANN, D. ODENTHAL, AND T. BÜNTE. Advantages of active steering for vehicle dynamics control. In “in Proc. 32nd International Symposium on Automotive Technology and Automation”, pages 263–270, Vienna, Austria (1999). (Cité page 82.)
- [ASK<sup>+</sup>92] R. W. ALLEN, H. T. SZOSTAK, D. H. KLYDE, T. J. ROSENTHAL, , AND K. J. OWENS. Vehicle dynamic stability and rollover. tech. rep, Systems Technology, Inc, NHTSA 263, Hawthorne, CA, U.S.-D.O.T., NHTSA, USA (1992). (Cité page 62.)
- [BC70] J.R. BENJAMIN AND A. CORNELL. “Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers”. McGraw-Hill Book co, Paris (1970). (Cité page 77.)
- [BDB02] J.P. BARBOT, M. DJEMAI, AND T. BOUKHOBZA. Sliding mode observers. In

- W. PERRUQUETTI AND J.P. BARBOT, editors, “Sliding Mode Control in Engineering”, Control Engineering, pages 103–130. Marcel Dekker, New York (2002). (Cité page 62.)
- [BF05] I. BOIKO AND L. FRIDMAN. Analysis of chattering in continuous sliding-mode controllers. *IEEE Transaction on automatic control* **50**(9) (September 2005). (Cité pages 82 et 86.)
- [Bou05] M. BOUTELDJA. “Modélisation des Interactions Dynamiques Poids Lourds/Infrastructures Pour la Sécurité et les Alertes”. PhD thesis, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (décembre 2005). (Cité page 51.)
- [BPL89] E. BAKKER, H. PACEJKA, AND L. LINDER. A new tire model with an application in vehicle dynamics studies. In “SAE”, volume 98 of “6”, pages 101–113 (1989). (Cité pages 84 et 118.)
- [Bur93] M. BURCKHARDT. “Fahrwerktechnik, Radschlupfregelsysteme”. Vogel Verlag, Germany (1993). (Cité page 117.)
- [Ceb93] D. CEBON. Interaction between heavy vehicles and roads. In “Society of Automotive Engineers”, pages SP-931, 81 p, USA (1993). (Cité page 51.)
- [CL02] V. COSSALTER AND R. LOT. A motorcycle multibody model for real time simulation based on the natural coordinates approach. *Vehicle System dynamics* **37**(6), 423–447 (2002). (Cité page 113.)
- [CP99a] B. C. CHEN AND H. PENG. A real-time rollover threat index for sports utility vehicles. In “American Control Conference”, pages 1233–1237, San Diego, USA (1999). (Cité page 62.)
- [CP99b] B. C. CHEN AND H. PENG. Rollover warning of articulated vehicles based on a time-to-rollover metric. In “Proc. ASME Int. Congress and Exploitation” (November 1999). (Cité page 62.)
- [CT95] C. CHEN AND M. TOMIZUKA. Dynamic modeling of articulated vehicles for automated highway systems. In “American Control Conference”, pages 653–657 (1995). (Cité page 51.)
- [Del04] Y. DELANNE. Application des méthodes de traitement du signal et d’identification aux études sur l’interaction véhicule/pneumatique/chaussée. Habilitation à diriger la recherche, HDR de l’Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (2004). (Cité page 55.)

- [DF05] J. DAVILA AND L. FRIDMAN. Observation and identification of second order mechanical systems via second order sliding modes. In “Memorias de Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático 2005”, Cuernavaca, Morelos, México (2005). (Cité page 90.)
- [DFL05] J. DAVILA, L. FRIDMAN, AND A. LEVANT. Second-order sliding-mode observer for mechanical systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.* **50**(11), 1785–1789 (November 2005). (Cité page 62.)
- [DFP06] J. DAVILA, L. FRIDMAN, AND A. POZNYAK. Observation and identification of mechanical systems via second order sliding modes. In “2006 International Workshop on Variable Structure Systems - VSS’06”, pages 232–237, Sardinia, Italy (2006). (Cité pages 81, 82 et 90.)
- [DG08] V. DOLCEMASCOLO AND M. GOTHIE. “Poids lourds et sécurité routière”. Rapport d’étude et recherches ERLPC, France (2008). (Cité page 60.)
- [DIDW03] W.H. DOUGLAS, B.P. INGRID, J.T. DARREN, AND D.G. WILLIAM. Highway/heavy vehicle interactionl. In “Transportation Research Board, A Synthesis of Safety Practice, Commercial truck and bus safety”, volume 1, Washington, DC, USA (Juillet 2003). (Cité page 87.)
- [DISB07] J. DAKHLALLAH, H. IMINE, Y. SELLAMI, AND D. BELLOT. Heavy vehicle state estimation and rollover risk evaluation using kalman filter and sliding mode observer. In “ECC07, IEEE European Control Conference”, pages 3444–3449, Kos, Grece (02-05 July 2007). (Cité pages 18, 21, 44 et 62.)
- [DMW<sup>+</sup>09] V. DOLCEMASCOLO, N. MEFTI, L. G. WÄGBERG, S. DEIX, AND E. O’BIEN. Model bases calculation of bridge load effect and expected lifetime (fatigue) grounded on long term measurements. contribution au livrable de la tâche 2.5 du projet heavyroute, (Mars 2009). (Cité page 14.)
- [DSD03] Y. DELANNE, V. SCHMITT, AND V. DOLCEMASCOLO. Heavy truck rollover simulation. In “18th International Conference on the Enhanced Safety of Vehicles”, pages 1233–1237, Nagoya, Japan (2003). (Cité pages 55 et 56.)
- [DVCL10] M. DOUMIATI, A.C. VICTORINO, A. CHARARA, AND D. LECHNER. Observers for vehicle tyre/road forces estimation: experimental validation. *Vehicle System Dynamics* **48**(11), 1345–1378 (2010). (Cité page 62.)
- [EKL86] S. V. EMELYANOV, S. K. KOROVIN, AND L. V. LEVANTOVSKY. Second order sliding modes in controlling uncertain systems. *Soviet Journal of Computer and System Science* pages 63–68 (1986). (Cité page 81.)

- [EP05] P. ERTO AND B. PALUMBO. Origins, properties and parameters estimation of the hyperbolic reliability model. *IEEE Trans. Reliability* **54**, 276–281 (June 2005). (Cité page 72.)
- [ES73] D. EATON AND L. SEGEL. Lateral dynamics of the uncontrolled motorcycle. In “Second International Congress on Automotive Safety” (1973). (Cité page 109.)
- [FDL08] L. FRIDMAN, J. DAVILA, AND A. LEVANT. High-order sliding modes observation. In “10th International Workshop on Variable Structure Systems”, pages 203–208, Antalya, Turkey (2008). (Cité page 62.)
- [FEI<sup>+</sup>08] S. FORKERT, C. EICHHOR, H. IMINE, M. HANNACHI, V. CEREZO, A. IHS, L. SJÖGREN, AND K. WEEVER. Design and specification of route guidance, driving support and critical infrastructure management. contribution au livrable de la tâche 3.2 du projet heavyroute, (Septembre 2008). (Cité pages 15, 46, 47, 56, 58 et 94.)
- [FLD08] L. FRIDMAN, A. LEVANT, AND J. DAVILA. Observation and identification via high-order sliding modes. In G. BARTOLINI, L. FRIDMAN, A. PISANO, AND E. USAI, editors, “Modern Sliding Mode Control Theory: New Perspectives and Applications”, number 375 in Lecture Notes in Control and Information Science, pages 293–319. Springer Verlag, London (2008). (Cité page 64.)
- [FPLL01] F. FLORET-PONTET AND F. LAMNABHI-LAGARRIGUE. Parameter identification methodology using sliding mode observers. *Int. Journal of Control* **74**(18), 1743–1753 (2001). (Cité page 81.)
- [Gau02] O. GAUDOIN. “Modèles stochastiques et méthodes statistiques pour la fiabilité des systèmes”. PhD thesis, Thèse d’Habilitation, INP Grenoble (décembre 2002). (Cité page 72.)
- [GBGR07] R. GEORGE, C. BLANKSBY, A. GERMANCHEV, AND A. RITZINGER. Measuring heavy vehicle wheel loads dynamically. Technical report at1212, ARRB (2007). (Cité page 100.)
- [GEGK01] R. W. GOLDMAN, M. EL-GINDY, AND B. T. KULAKOWSKI. Rollover dynamics of road vehicles: literature survey. *International Journal of Heavy Vehicle Systems* **8**, 103–141 (2001). (Cité page 62.)
- [GSB06] P. GASPAR, Z. SZABO, AND J. BOKOR. Side force coefficient estimation for the design of active brake control. In “ACC, American Control Conference”, Minneapolis, Minnesota, USA (14-16 June 2006). (Cité page 85.)

- [Hau83] M.L. HAUTUS. Strong detectability and observers. *Linear Algebra and its Applications* **50**, 353–368 (1983). (Cité pages 82 et 86.)
- [HB02] M. HALDANE AND J. BUNKER. Assessing the impacts of multi-combination vehicles on traffic operations and safety. A literature review, Queensland Government, Department of main roads (2002). (Cité page 87.)
- [HH02] M. HUTALA AND P. HALONEN. Instrumented vehicle and its use for calibration of wim systems. In “7th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions”, pages 2217–2222, Delft, Netherlands (2002). (Cité page 94.)
- [HIA12] N. HAMADI, H. IMINE, AND D. AMEDDAH. Outils génériques pour le développement d’un modèle de véhicule articulé tout terrain. In “ICIEM12, second International Conference on Industrial Engineering and Manufacturing”, Batna, Algérie (06-07 May 2012). (Cité pages 17 et 45.)
- [HL74] A.M. HASOFER AND N. LIND. An exact and invariant first-order reliability format. *Journal of Engineering Mechanics* **100**, 111–121 (1974). (Cité page 77.)
- [HvAH<sup>+</sup>05] B. HOOGVELT, N. VAN ASSELDONK, R. HENNY, H. VAN LOO, AND G. VISSER. Weigh in motion, vehicle for dynamic calibration of a multiple weigh-in-motion system. *Bulletin de l’organisation internationale de métrologie légale* 1, (2005). (Cité page 94.)
- [IBF09] H. IMINE, A. BENALLEGUE, AND L. FRIDMAN. Experimental validation of unknown inputs estimation of heavy vehicle via high order sliding mode observer. In “12th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems, CTS’09”, pages 413–419, California, USA (2-4 September 2009). (Cité pages 43 et 90.)
- [IBMS09] H. IMINE, A. BENALLEGUE, T. MADANI, AND S. SRAIRI. Rollover risk prediction of an instrumented heavy vehicle using high order sliding mode observer. In “ICRA, IEEE International Conference on Robotics and Automation”, pages 64–69, Kobe, Japan (12-17 May 2009). (Cité pages 14, 43 et 62.)
- [IBMS11] H. IMINE, A. BENALLEGUE, T. MADANI, AND S. SRAIRI. Rollover risk prediction of an instrumented heavy vehicle using high order sliding mode observer. *en cours de révision à Control Engineering Practice* (Janvier 2011). (Cité pages 14 et 43.)

- [Ibr04a] I. M. IBRAHIM. Design of reducing the generated dynamic tyre loads of the articulated tanker vehicles. *Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design* **11**(1), 86–99 (2004). (Cité page 51.)
- [Ibr04b] I. M. IBRAHIM. generally applicable 3d truck ride simulation with coupled rigid bodies and finite element models. *Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design* **11**(1), 67–85 (2004). (Cité page 51.)
- [ID06a] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. développement fonctionnel et étude de faisabilité. contribution au livrable du projet vif, (Juin 2006). (Cité page 56.)
- [ID06b] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. Influence of the road profile on wheel and vehicle loads estimation. In “9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions”, Pennsylvania, USA (18-22 June 2006). (Cité page 94.)
- [ID06c] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. Warning system to prevent rollover of heavy vehicles. In “9th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions”, Pennsylvania, USA (18-22 June 2006). (Cité page 62.)
- [ID07a] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. développement fonctionnel et étude de faisabilité. contribution au livrable de la tâche 1 du projet vif2, (2007). (Cité page 62.)
- [ID07b] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. Rollover risk prediction of heavy vehicle in interaction with infrastructure. *IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems* **14**(3), 294–307 (2007). (Cité pages 62 et 94.)
- [ID08] H. IMINE AND V. DOLCEMASCOLO. Rollover risk prediction of heavy vehicle in interaction with infrastructure. *IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems* **14**(3), 294–307 (2008). (Cité page 63.)
- [IDKG12] H. IMINE, M. DJEMAI, O. KHEMOUDJ, AND A. GERMANCHEV. Sliding mode observers for tyre vertical forces estimation: experimental results using alf. In “HVT12, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology”, Stockholm, Sweden (September 16-19 2012). (Cité pages 18, 44 et 46.)
- [IDM03] H. IMINE, Y. DELANNE, AND N.K. M’SIRDI. Adaptive observers and estimation of the road profile. *SAE Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems* **112**(6), 1312–1317 (September 2003). (Cité page 40.)

- [IDM06] H. IMINE, Y. DELANNE, AND N.K. M'SIRDI. Road profiles inputs estimation in vehicle dynamics simulation. *IAVSD, International Journal of Vehicle System Dynamics* **44**(4), 285–303 (April 2006). (Cité page 90.)
- [IDS08] H. IMINE, J. DAKHLALAH, AND Y. SELLAMI. Validation expérimentale de l'identification de la hauteur du centre de gravité du poids lourd et de l'estimation du risque de renversement. In “CIFA, Conférence Internationale Francophone d'Automatique”, Bucarest, Roumanie (03-05 Septembre 2008). (Cité pages 18 et 21.)
- [IDV+07] H. IMINE, V. DOLCEMASCOLO, S. VERGER, J. RECEVEUR, AND M. HAMMER. Spécifications détaillées des sous ensembles et leurs interfaces, plan d'expérimentations des sous ensembles. contribution aux livrables des tâches 3.1 et 3.2 du projet vif2, (Avril 2007). (Cité page 62.)
- [IDV+08] H. IMINE, V. DOLCEMASCOLO, S. VERGER, J. RECEVEUR, AND M. HAMMER. Intégration des composants du système vif : Résultat des tests avant intégration. contribution au livrable de la tâche 4 du projet vif2, (Avril 2008). (Cité pages 14, 43 et 56.)
- [IES+07] H. IMINE, C. EICHHORN, L. SJÖGREN, U. HAMMARSTRÖM, M. ÖGREN, A. IHS, AND F. BODE. Tools, methods and data for vehicle/infrastructure interaction and traffic measurement. contribution au livrable d2.4 du projet heavyroute, (Septembre 2007). (Cité page 62.)
- [IF07] H. IMINE AND L. FRIDMAN. Estimation of the unknown inputs and vertical forces of the heavy vehicle via higher order sliding mode observer. In “IV07, IEEE Intelligent Vehicles Symposium”, pages 949–954, Istanbul, Turkey (13-15 July 2007). (Cité pages 45, 50 et 90.)
- [IF08] H. IMINE AND L. FRIDMAN. Road profile estimation in heavy vehicle dynamics simulation. *IJVD, International Journal of Vehicle Design* **47**(1, 2, 3, 4), 234–249 (2008). (Cité pages 45, 50 et 90.)
- [IFM11a] H. IMINE, L. FRIDMAN, AND T. MADANI. Identification of vehicle parameters and estimation of vertical forces. *en cours de révision à IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* (Janvier 2011). (Cité page 45.)
- [IFM11b] H. IMINE, L. FRIDMAN, AND T. MADANI. Steering control for rollover avoidance of heavy vehicle. *accepté à IEEE Transactions on Vehicular Technology* (Juin 2011). (Cité pages 45 et 86.)

- [IFS12] H. IMINE, L. FRIDMAN, AND H. SHRAIM. Identification of heavy vehicle suspension parameters and estimation of vertical forces. In “VSS12, International Workshop on Variable Structure Systems”, pages 63–69, Bombay, India (12-14 Janvier 2012). (Cité pages [44](#), [45](#) et [82](#).)
- [IFSD11] H. IMINE, L. FRIDMAN, H. SRAIM, AND M. DJEMAI. “Sliding Mode Based Analysis and Identification of Vehicle Dynamics”, volume 414. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH and Co, Lecture Notes in Control and Information Sciences (Juillet 2011). (Cité pages [44](#), [45](#) et [82](#).)
- [IHCO08] H. IMINE, M. HANNACHI, C. CAPRANI, AND E. O’BIEN. Evolvetraffic: A traffic microsimulation model for bridge loading. Technical Report, (Aout 2008). (Cité pages [15](#) et [46](#).)
- [IHO+08] H. IMINE, M. HANNACHI, E. O’BIEN, D. SIEGERT, M. ARROYO, L. SJÖGREN, S. DEIX, S. ERLINGSSON, L. WÄGGER, AND M. RALBOVSKÝ. Models to estimate hgv impact on infrastructure to be used in route planning. contribution au livrable de la tâche 2.5 du projet heavyroute, (Octobre 2008). (Cité pages [15](#), [45](#), [46](#), [47](#) et [51](#).)
- [IK11] H. IMINE AND O. KHEMOUDJ. Dynamic parameters identification and estimation of the vertical forces of heavy vehicle. In “SAE’11 World congress on automotive”, Detroit, USA (13-15 Avril 2011). (Cité pages [18](#), [44](#), [82](#) et [93](#).)
- [IM11] H. IMINE AND T. MADANI. Sliding mode control for automated lane guidance of heavy vehicle. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, published online in Wiley Online Library ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)), DOI: 10.1002/rnc.1818 (August 2011). (Cité page [87](#).)
- [IMB10] H. IMINE, T. MADANI, AND A. BENALLEGUE. Rollover avoidance of heavy vehicles using sliding mode observer-controller. In “HVT11, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology”, Melbourne, Australia (15-17 March 2010). (Cité pages [43](#) et [86](#).)
- [IMD03] H. IMINE, N.K. M’SIRDI, AND Y. DELANNE. Adaptive observers and estimation of the road profile. In “SAE World Congress”, pages 175–180, Detroit, Michigan, USA (03-06 March 2003). (Cité page [39](#).)
- [IMF11] H. IMINE, T. MADANI, AND L. FRIDMAN. Sliding mode controller for heavy vehicle lane departure avoidance. In “ICCA11, 9th IEEE International Conference on Control and Automation”, pages 372–377, Santiago, Chile (December 19-21 2011). (Cité pages [45](#) et [87](#).)

- [Imi03] H. IMINE. “Observation d’état d’un véhicule pour l’estimation des traces de roulement”. PhD thesis, Doctorat de Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines (2003). (Cité pages 16, 88 et 120.)
- [Imi07] H. IMINE. Heavy vehicle modelling, evaluation and prevention of rollover. In “ECTRI, Young researcher seminar”, Brno, Czech Republic (28-30 May 2007). (Cité page 62.)
- [Imi08] H. IMINE. Vehicle characteristics governing their safety. livrable d2.3 du projet heavyroute, (Janvier 2008). (Cité page 62.)
- [Imi09] H. IMINE. Calcul de la vitesse max et alerte au renversement. rapport de recherche de l’or plinfra, (Avril 2009). (Cité page 63.)
- [Imi10a] H. IMINE. Estimation of unknown inputs of heavy vehicle: experimental validation. In “HVTT11, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology”, Melbourne, Australia (15-17 March 2010). (Cité page 88.)
- [Imi10b] H. IMINE. “Observation d’états d’un véhicule pour l’estimation du profil dans les traces de roulement”. Éditions Universitaires Européennes (Juillet 2010). (Cité pages 88 et 120.)
- [Imi11] H. IMINE. Identification of heavy vehicle parameters and steering control for rollover avoidance. In “IAVSD, International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks”, Manchester, UK (August 14-19 2011). (Cité pages 82 et 86.)
- [IMS08] H. IMINE, T. MADANI, AND S. SRAIRI. High order sliding mode observers to estimate vertical forces: experimental results. In “ITSC, IEEE Intelligent Transportation Systems Society”, pages 523–527, Beijing, China (12-15 October 2008). (Cité pages 14 et 94.)
- [IRR+08] H. IMINE, J. RECEVEUR, C. ROMEGGIO, M. HAMMER, S. SRAIRI, T. MADANI, AND A. BENALLEGUE. Plan d’expérience, tests fonctionnels, plan d’expérimentation, résultats. contribution au livrable de la tâche 6 du projet vif2, (Juin 2008). (Cité pages 14 et 62.)
- [ISF11] H. IMINE, H. SHRAIM, AND L. FRIDMAN. Identification of heavy vehicle suspension parameters and estimation of vertical forces. *en cours de révision à Control Engineering Practice, special issue: Variable Structure Systems Techniques in Applications* (Janvier 2011). (Cité pages 44 et 45.)
- [ISGR08] H. IMINE, S. SRAIRI, D. GIL, AND J. RECEVEUR. Heavy vehicle, vehicle management center and infrastructure interactivity to manage the access

- to infrastructure. In “ICHV, International Conference on Heavy Vehicle”, pages 103–109, Paris, France (19-22 May 2008). (Cité pages 14 et 56.)
- [ISI<sup>+</sup>09] A. IHS, L. SJÖGREN, H. IMINE, V. CEREZO, G. LINDBERG, S. DEIX, S. FORKERT, R. KARLSSON, AND M. RALBOVSK. Final summary report. contribution au livrable final du projet heavyroute, (Novembre 2009). (Cité pages 15, 46 et 47.)
- [ISIH08] A. IHS, L. SJÖGREN, H. IMINE, AND M. HANNACHI. Tests and evaluations. contribution au livrable de la tâche 5.2 du projet heavyroute, (Novembre 2008). (Cité pages 15, 46, 56 et 58.)
- [ISM08a] H. IMINE, S. SRAIRI, AND T. MADANI. Experimental validation of rollover risk prediction of heavy vehicles. In “TRA, Transport Research Arena”, Ljubljana, Slovenia (21-25 April 2008). (Cité page 14.)
- [ISM08b] H. IMINE, S. SRAIRI, AND T. MADANI. Observateurs à modes glissants pour l’étude de renversement d’un poids lourd: résultats expérimentaux. In “CIFA, Conférence Internationale Francophone d’Automatique”, Bucarest, Roumanie (03-05 Septembre 2008). (Cité page 14.)
- [Jac98] B. JACOB. Weigh in motion of road vehicles. In “2nd European conference”, Lisbon, Portugal (1998). (Cité page 56.)
- [JOJ05] B. JACOB, E. O’BIEN, AND S. JEHAES. Pesage en marche des véhicules routiers : Rapport final. Technical Report, Cost 323, Wim-load (1993-1998) (2005). (Cité page 56.)
- [JS82] J.R. JARVIS AND P.F. SWEATMAN. The loading of pavements in the vicinity of road humps. In “11th Australian road research board (arrb) conference”, Melbourne, Australia (1982). (Cité page 93.)
- [KAN88] T. KATAYAMA, A. AOKIA, AND T. NISHIMIA. Control behaviour of motorcycle riders. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* **17**, 211–229 (1988). (Cité page 111.)
- [KBIE11a] A. KHETTAT, S. BOUAZIZ, H. IMINE, AND S. ESPIÉ. Two-wheeled motorcycle automation: System approach. In “WoSSPA2011, 7th International Workshop on Systems, Signal Processing and their Applications”, pages 47–50, Tipaza, Algeria (May 09-11 2011). (Cité pages 16, 44, 106 et 122.)
- [KBIE11b] A. KHETTAT, S. BOUAZIZ, H. IMINE, AND S. ESPIÉ. Two-wheeled motorcycle control based on roll stabilization at zero velocity. In “AIM’12, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics”, KaoHsiung, Taiwan (July 11-14, 2012 2011). (Cité pages 16, 44

- et 106.)
- [Khe10] O. KHEMOUDJ. “Développement d’un système de pesage embarqué pour poids lourd”. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis (2010). (Cité page 93.)
- [KI12] N. KHRAIEF AND H. IMINE. Rollover risk evaluation of heavy vehicle via global bifurcation analysis. In “AHVEC, Advances in Heavy Vehicle Safety, Energy Efficiency, and Controls, workshop in Intelligent Vehicles Symposium, IV’12”, Alcalá de Henares, Spain (03-07 June 2012). (Cité page 46.)
- [KID09] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Unknown input observation via sliding modes: application to vehicle contact forces. In “IEEE Multi-conference on Systems and Control”, pages 1720–1725, Saint Petersburg, Russia (8-10 July 2009). (Cité pages 18 et 44.)
- [KID10a] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Control theory approach for on-board estimation and monitoring of heavy duty vehicle dynamical tyre. In “HVT11, International Symposium on Heavy Vehicle Transport Technology”, Melbourne, Australia (15-17 March 2010). (Cité pages 18, 44, 94 et 101.)
- [KID10b] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Estimation des forces d’impact des véhicules poids lourds par différentiateurs exacts et modèle inverse. In “CIFA, Conférence internationale francophone d’automatique”, Nancy, France (2-6 juin 2010). (Cité pages 18, 44 et 93.)
- [KID10c] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Nouvelle approche pour l’estimation des forces d’impact de poids lourd. In “PRAC, Conférence sécurité routière Prévention des Risques et Aides à la Conduite”, Paris, France (04-05 Mai 2010). (Cité pages 18 et 44.)
- [KID10d] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Robust observation of tractor-trailer vertical forces using model inverse and numerical differentiation. In “SAE, World Automotive”, Detroit, USA (12-15 Avril 2010). (Cité pages 18, 39, 44, 51 et 93.)
- [KID10e] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Robust observation of tractor-trailer vertical forces using inverse model and exact differentiator. *SAE, International Journal of Materials and Manufacturing* **3**(1), 278–289 (August 2010). (Cité pages 18, 39, 44 et 93.)
- [KID11] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, AND M. DJEMAI. Heavy duty vehicle tyre forces

- estimation using variable gain sliding mode observer. *IJVD, International Journal of Vehicle Design, special issue in Variable Structure System in automotive application* (Juillet 2011). (Cité pages 18 et 44.)
- [KIDB11] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, M. DJEMAI, AND K. BUSAWON. Robust observation of tyre forces for heavy duty vehicles. *IJHVS, International Journal of Heavy Vehicle Systems* (Juin 2011). (Cité pages 18 et 44.)
- [KIDF10] O. KHEMOUDJ, H. IMINE, M. DJEMAI, AND L. FRIDMAN. Variable gain sliding mode observer for heavy duty vehicle tyre forces estimation. In “11th International Workshop on Variable Structure Systems, VSS10”, pages 522–527, Mexico city, Mexico (26-28 June 2010). (Cité pages 18, 44, 45 et 95.)
- [KN05] U. KIENCKE AND L. NIELSEN. “Automotive Control Systems: For Engine, Driveline and Vehicle”. Springer-Verlag (2005). (Cité page 117.)
- [Koe83] C. KOENEN. “The dynamic behaviour of motorcycles when running straight ahead and when cornering”. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut- Cambresis (1983). (Cité pages 110 et 112.)
- [KP80] C. KOENEN AND H.B. PACEJKA. Vibrational modes of motorcycles in curve. In “International Motorcycle Safety Conference”, Washington D.C, USA (1980). (Cité page 110.)
- [KP82] C. KOENEN AND H.B. PACEJKA. Influence of frame elasticity, simple rider body dynamics and tyre moments on free vibrations of motorcycles in curves. In “IAVSD Symposium” (1982). (Cité page 110.)
- [LCC96] R.C. LIN, D. CEBON, AND D.J. COLE. Optimal roll control of a single-unit lorry. *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers Part D-journal of Automobile Engineering, PROC INST MECH* **210**, 45–55 (1996). (Cité page 82.)
- [LDG96] V. LEGEAY, P. DABURON, AND C. GOURRAUD. Comparaison de mesures de l’uni par l’analyseur de profil en long et par compensation dynamique. Bulletin interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, DGER/IRVAR (Décembre 1996). (Cité page 88.)
- [LEG03] A. S. LEWIS AND M. EL-GINDY. Sliding mode control for rollover prevention of heavy vehicles based on lateral acceleration. *International Journal of Heavy Vehicle Systems* **10**, 9–34 (2003). (Cité pages 85 et 100.)
- [Lem05] M. LEMAIRE. “Fiabilité des structures. Couplage mécano-fiabiliste statique”. Ed. Hermes Lavoisier (2005). (Cité pages 75 et 76.)

- [Lev98] A. LEVANT. Robust exact differentiation via sliding mode technique. *Automatica* **34**(3), 379–384 (1998). (Cité pages 62, 82 et 86.)
- [Mam99] S. MAMMAR. Tractor-semitrailer lateral control robust reduced order two-degree-of-freedom. In “Proceedings of the American Control Conference”, pages 3158–3162, San Diego, California (June 02-04 1999). (Cité pages 82 et 87.)
- [Mam02] S. MAMMAR. Contrôle latérale assisté et automatisé des véhicules: Approche par commandes robustes. Habilitation à diriger la recherche, HDR de l’Université d’Evry-Val d’Essonne (Septembre 2002). (Cité page 117.)
- [MBIC04] R. MERZOUKI, M. BOUTELDJA, H. IMINE, AND J. C. CADIOU. Friction force estimation and adaptive control for tire road contact. In “IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS04”, pages 2434–2439, Sendai, Japan (September 28, October 02 2004). (Cité page 43.)
- [Mel99] R. E. MELCHERS. “Structural reliability analysis and prediction”. Wiley, Second Edition (1999). (Cité page 75.)
- [Miè03] A.J.P. MIÈGE. “Active roll control of an experimental articulated vehicle”. PhD thesis, University of Cambridge, Department of Engineering, UK (2003). (Cité page 85.)
- [MN96] C. MAEDER AND M. NICOLLE. Weigh in motion, a roadway and traffic management tool. In “7th International Road Conference”, pages 274–283, Budapest, Hungary (1996). (Cité page 56.)
- [MSSG08] N. MEFTI, L. SJÖGREN, D. SIEGERT, AND K. GUSTAFSON. Available bridge databases and relevant data. contribution au livrable de la tâche 2.5 du projet heavyroute, (Avril 2008). (Cité page 14.)
- [Nel05] W.B. NELSON. A bibliography of accelerated test plans. *IEEE Trans. Reliability* **54**, 194–373 (2005). (Cité page 72.)
- [NKA<sup>+</sup>10] L. NEHAOUA, A. KHETTAT, H. ARIQUI, H. IMINE, AND S. ESPIÉ. Rider steer torque estimation for motorcycle riding simulator. In “IFAC Symposium on Mechatronic Systems”, Cambridge, Massachusetts, USA (September 13-15 2010). (Cité pages 16, 44 et 106.)
- [OBA99] D. ODENTHAL, T. BÜNTE, AND J. ACKERMANN. Nonlinear steering and braking control for vehicle rollover avoidance. In “In Proc. European Control Conference”, Karlsruhe, Germany (31 Aug-3 Sept 1999). (Cité pages 82 et 85.)

- [ONI05] ONISR. La sécurité routière en France. bilan de l'année 2004. La documentation française, sécurité routière, Observatoire National Interministériel de sécurité routière (Juillet 2005). (Cité page 60.)
- [Pac89] H. PACEJKA. Modeling of the pneumatic tyre and its impact on vehicle dynamic behavior. Technical Report, Vehicle Research Laboratory, Delft University of Technology, Netherlands (1989). (Cité page 84.)
- [PB91] H. PACEJKA AND E. BAKKER. The magic formula tyre model. In "Proceedings, 1st International Colloq on Tyre models for vehicle dynamics analysis", pages 1–18 (1991). (Cité page 118.)
- [PB02] W. PERRUQUETTI AND J.P. BARBOT. "Sliding Mode Control in Engineering". Marcel Dekker (2002). (Cité page 62.)
- [Pfl86] H.C. PFLUG. Lateral dynamic behaviour of truck-trailer combinations due to the influence of the load. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* **15**, 155–175 (1986). (Cité page 51.)
- [PS91] H. PACEJKA AND R. SHARP. Shear force development by pneumatic tyres in steady state conditions : A review of modelling aspects. *Vehicle System Dynamics* **20**, 121–176 (1991). (Cité page 112.)
- [RCJH05] R.L. ROEBUCK, D. CEBON, B.P. JEPPESEN, AND J. HAQUE. A systems approach to controlled heavy vehicle suspensions. *International Journal of Heavy Vehicle Systems* **12**, 169–192 (2005). (Cité page 82.)
- [Rja59] A.R. RJANITZYNE. "Calcul de la rupture et plasticité des constructions". Eyrolles, Paris (1959). (Cité page 77.)
- [SA80] R. SHARP AND C. ALSTEAD. The influence of structural flexibilities on the straightrunning stability of motorcycles. *Vehicle System Dynamics* **9**, 327–357 (1980). (Cité page 110.)
- [SC03] D. SAMPSON AND D. CEBON. Active roll control of single unit heavy road vehicles. *Vehicle System Dynamics* **40**, 229–270 (2003). (Cité pages 82 et 85.)
- [SCM05] J. STÉPHANT, A. CHARARA, AND D. MEIZEL. Evaluation of sliding mode observer for vehicle side slip angle. In "16th IFAC World Congress" (2005). (Cité page 62.)
- [Sel08] Y. SELLAMI. "Approche Fiabiliste et Mécanique du Comportement des Poids Lourds et de Leur Sécurité". PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes (2008). (Cité pages 71 et 80.)

- [Sha71] R. SHARP. The stability and control of motorcycles. *Journal of Mechanical Engineering Science* **13**, 316–329 (1971). (Cité page 107.)
- [Sha76] R. SHARP. The stability of motorcycles in acceleration and decelerations. *Journal of Mechanical Engineering Science* pages 45–49 (1976). (Cité page 109.)
- [Sha94] R. SHARP. Vibrational modes of motorcycles and their design parameter sensitivities. In “International Conference on Mechanical Engineering”, pages 107–121 (1994). (Cité page 111.)
- [SI08] Y. SELLAMI AND H. IMINE. Probabilistic approach to rollover risk analysis of heavy vehicles. In “TRA, Transport Research Arena”, Ljubljana, Slovenia (21-25 April 2008). (Cité pages 18, 44 et 80.)
- [SIB+08a] Y. SELLAMI, H. IMINE, F. BERNARDIN, J. C. CADIOU, AND B. JACOB. Probabilistic detection of rollover risk of heavy vehicles. In “SAE World Automotive Congress”, Detroit, USA (14-17 April 2008). (Cité pages 18, 44 et 78.)
- [SIB+08b] Y. SELLAMI, H. IMINE, F. BERNARDIN, J. C. CADIOU, AND B. JACOB. Rollover risk prevention of heavy vehicles by reliability-based analysis. In “International Conference on Heavy Vehicle”, pages 199–208, Paris, France (19-22 May 2008). (Cité pages 18, 44 et 80.)
- [SICH08] Y. SELLAMI, H. IMINE, J. C. CAIDOU, AND A. HADRI. Evaluation du risque de renversement de poids lourds par indice de fiabilité. In “CIFA, Conférence Internationale Francophone d’Automatique”, Bucarest, Roumanie (03-05 Septembre 2008). (Cité pages 18, 44 et 77.)
- [SIF11] H. SHRAIM, H. IMINE, AND L. FRIDMAN. Estimation and analysis of the tire pressure effects on the behavior of the vehicle center of gravity. *IJVD, International Journal of Vehicle Design, special issue in Variable Structure System in automotive application* (Juillet 2011). (Cité page 44.)
- [SJ77] R. SHARP AND C. J. JONES. The straight-running stability of single track vehicles. In “2nd IUTAM Symposium”, pages 334–342, Vienna, Austria (Sept 19-23 1977). (Cité page 109.)
- [SK64] E.B. SPANGLER AND W.J. KELLY. Gmr road profilometer method for measuring road profile. Technical Report GMR-452, General Motors Research Publication (1964). (Cité page 88.)
- [SL01] R. SHARP AND D. LIMBEER. A motorcycle model for stability and control analysis. *Multibody System Dynamics, Kluwer Academic Publishers* **6**,

- 123–142 (2001). (Cité page [112](#).)
- [Spi81] P. SPIERINGS. The effects of lateral front fork flexibility on the vibrational modes of straightrunning single track vehicles. *Vehicle System Dynamics* **10**, 21–35 (1981). (Cité page [110](#).)
- [SS89] T. SODERSTROM AND P. STOICA. “System Identification”. Cambridge, Great Britain: Prentice Hall International (1989). (Cité page [81](#).)
- [SVS<sup>+</sup>10] S. M. SAVARESI, C.P. VASSAL, C. SPELTA, L. DUGARD, AND O. SENAME. “Semi-Active Suspension Control Design for Vehicles”. Elsevier Ltd (2010). (Cité page [82](#).)
- [SW75] L. SEGEL AND R. WILSON. Requirements for describing the mechanics of tyres used on single-track vehicles. In “IUTAM Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Railway Tracks” (1975). (Cité page [109](#).)
- [Teb05] O. TEBBI. “Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés”. PhD thesis, Université d’Angers (2005). (Cité page [72](#).)
- [TT04] M. TAI AND M. TOMIZUKA. Modelling of multi-unit heavy vehicle systems for automated guidance. *International Journal of Heavy Vehicle Systems* **11**, 26–46 (2004). (Cité page [51](#).)
- [TTWH99] M. TOMIZUKA, M. TAI, J-Y. WANG, AND P. HINGWE. Automated lane guidance of commercial vehicles. In “International Conference on Control and applications”, pages 1359–1364, Koala Coast-Island of Hawaii, USA (21-22 August 1999). (Cité page [87](#).)
- [TZZ<sup>+</sup>07] Z. TIANJUN, C. ZONG, H. ZHENG, C. TIAN, AND H. ZHENG. Yaw/roll stability modeling analyses and control of heavy tractor-semitrailer. In “SAE Intl. Asia Pacific Automotive Eng. Conf” (2007). (Cité page [85](#).)
- [UIS<sup>+</sup>08] A. UJJ, A. IHS, L. SJÖGREN, H. IMINE, M. HANNACHI, M. ARROYO, V. CEREZO, C. EICHHORN, F. BODE, D. OMASITS, S. RÖMER, S. DEIX, AND S. FORKERT. Test environment description and specifications. contribution au livrable de la tâche 5.1 du projet heavyroute, (Octobre 2008). (Cité pages [15](#), [45](#), [46](#), [47](#) et [58](#).)
- [Utk77] V. I. UTKIN. Variable structure systems with sliding mode. *IEEE Transactions on Automatic Control* **26**, 212–222 (1977). (Cité page [62](#).)
- [VdNFM08] J. VILLARGA, B. D’ANDREA NOVEL, M. FLIESS, AND H. MOUNIER. Estimation of longitudinal and lateral vehicle velocities : an algebraic approach. In “american control conference acc”, pages 3941–3946, Seattle, Washington, USA (June 11-13 2008). (Cité page [62](#).)

- [WT99] J.-Y. WANG AND M. TOMIZUKA. Robust h8 lateral control of heavy-duty vehicles in automated highway system. In “IEEE American Control Conference”, pages 3671–3675, San Diego, USA (June 02-04 1999). (Cité pages 82 et 87.)
- [WT01] J.-Y. WANG AND M. TOMIZUKA. Reachability analysis of hybrid lateral control problem for automated heavy-duty vehicles. In “IEEE American Control Conference”, pages 1–6, Arlington, VA, USA (June 2001). (Cité page 100.)
- [WZ78] D.H. WEIR AND J.W. ZELLNER. Lateral-directional motorcycle dynamics and rider control. Technical Report 780304, Society of Automotive Engineers (1978). (Cité page 109.)
- [WZT78] D.H. WEIR, J.W. ZELLNER, AND G. TEPER. Motorcycle handling. Technical Report TR-1086-1, Systems Technology Inc (1978). (Cité page 109.)
- [YRS01] X. YANG, S. RAKHEJA, AND I. STIHARU. Adapting an articulated vehicle to its drivers. *Journal of Mechanical Design* **123**, 132–140 (2001). (Cité page 51.)
- [YSZ<sup>+</sup>08] J. YI, D. SONG, Y. ZHANG, A. LEVANDOWSKI, AND S. JAYASURIYA. Trajectory tracking and balance stabilization control of an autonomous motorcycles. In “IEEE International Conference on Autonomous Robotics and Automation”, pages 2583–2589 (May 2008). (Cité page 121.)
- [ZO01] Y.G. ZHAO AND T. ONO. Moment methods for structural reliability. *Structural Safety* **23**, 47–75 (2001). (Cité page 76.)
- [Zwi05] X. ZWINGMANN. “Modèle d’évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception”. PhD thesis, Université Laval, Québec, Canada (2005). (Cité page 72.)

# Annexes

---

## Annexe A

# Modèle dynamique PL: description de matrices

---

Les matrices suivantes sont définies dans le chapitre "Estimation des forces d'impact" de la partie "Pesage dynamique et embarqué des PL".

La matrice  $B$  est donnée par:

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{I_{fw}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{rw}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{I_{tw}} & 0 \end{bmatrix}$$

Les matrices  $W_1$  et  $W_2$  sont données comme suite:

$$W_1 = \begin{bmatrix} \frac{l_{fh}}{I_{z1}} \sin \delta & 0 & 0 & \frac{l_{fh}}{I_{z1}} \cos \delta & -\frac{l_{rh}}{I_{z1}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{r_w}{I_{fw}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{r_w}{I_{rw}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{l_{rt}}{I_{z2}} & -\frac{l_{ft}}{I_{z2}} \sin \theta & \frac{l_{ft}}{I_{z2}} \cos \theta \\ 0 & 0 & \frac{r_w}{I_{tw}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = \begin{bmatrix} \frac{\cos \delta}{M_1} & \frac{1}{M_1} & 0 & \frac{\sin \delta}{M_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{M_1} & 0 \\ -\frac{\sin \delta}{M_1} & 0 & 0 & \frac{\cos \delta}{M_1} & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{M_1} \\ 0 & 0 & \frac{\cos \theta}{M_2} & 0 & 0 & -\frac{\sin \theta}{M_2} & \frac{1}{M_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sin \theta}{M_2} & 0 & 0 & \frac{\cos \theta}{M_2} & 0 & \frac{1}{M_2} \end{bmatrix}$$

